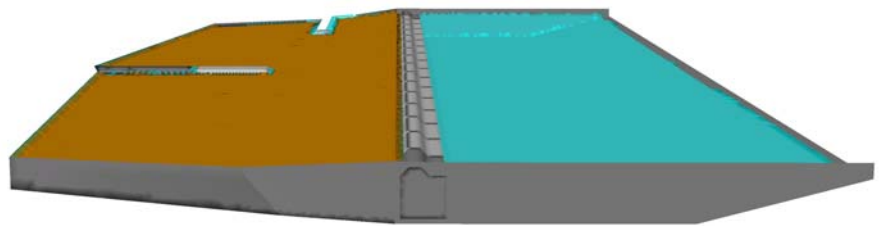
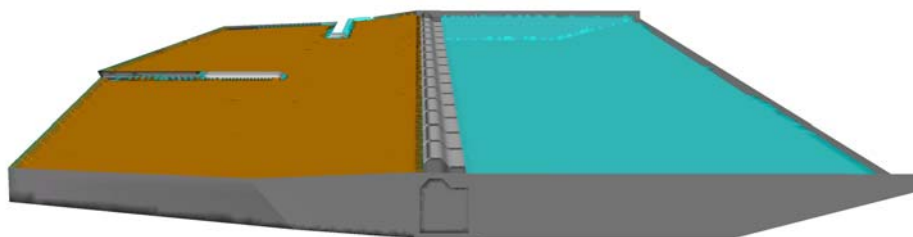


# **Trabajos realizados por CIMNE en relación con la rotura del muelle del Prat del puerto de Barcelona**



# **Trabajos realizados por CIMNE en relación con la rotura del muelle del Prat del puerto de Barcelona**



Informe Técnico, CIMNE IT-514, Julio 2007

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO REALIZADO.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS BIDIMENSIONAL.....</b>	<b>10</b>
3.1	SUPUESTOS DE ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS .....	11
3.2	CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS 2D .....	17
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL.....</b>	<b>18</b>
4.1	ANÁLISIS 3D. ESCENARIO 1. LICUEFACCIÓN INSTANTÁNEA. ....	20
4.2	ANÁLISIS 3D. ESCENARIO 2. LICUEFACCIÓN PROGRESIVA. UN FOCO DE LICUEFACCIÓN.....	26
4.2.1	<i>Rozamiento constante.....</i>	27
4.2.2	<i>Rozamiento variable. Densidad del relleno hidráulico: 1600 Kg/m<sup>3</sup> .....</i>	33
4.2.3	<i>Rozamiento variable. Densidad del relleno hidráulico: 1800 Kg/m<sup>3</sup>.....</i>	39
4.3	ANÁLISIS 3D. ESCENARIO 3. LICUEFACCIÓN PROGRESIVA. DOS FOCOS DE LICUEFACCIÓN.....	43
4.4	ANÁLISIS 3D. ESCENARIO 4. UN FOCO DE LICUEFACCIÓN ASIMÉTRICO.....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>54</b>
	<b>APÉNDICE 1. EQUIPO DE TRABAJO. ....</b>	<b>55</b>
	<b>APÉNDICE 2. ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD AL DESLIZAMIENTO ELÁSTICO DE UN CAJÓN.....</b>	<b>56</b>

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.	Geometría del modelo numérico para el análisis 2D.....	11
Figura 2.	Desplazamiento del cajón en varios instantes durante 32s. ( $\rho_M=2000\text{Kg/m}^3$ , $\rho_R=1600\text{Kg/m}^3$ .....	12
Figura 3.	Densidad $1.600\text{ kg/m}^3$ . Desplazamiento del cajón para diferentes valores de la viscosidad del relleno.....	13
Figura 4.	Densidad $1.700\text{ kg/m}^3$ . Desplazamiento del cajón para diferentes valores de la viscosidad del relleno.....	13
Figura 5.	Densidad $1.800\text{ kg/m}^3$ . Desplazamiento del cajón para diferentes valores de la viscosidad del relleno.....	14
Figura 6.	Densidad $1.900\text{ kg/m}^3$ . Desplazamiento del cajón para diferentes valores de la viscosidad del relleno.....	14
Figura 7.	Viscosidad del relleno constante de $10^{-6}\text{m}^2/\text{seg}$ . Desplazamiento del cajón en función de la densidad del relleno.....	15
Figura 8.	Viscosidad inicial del relleno $1\text{m}^2/\text{seg}$ . Desplazamiento del cajón en función de la densidad del relleno.....	15
Figura 9.	Viscosidad inicial del relleno de $10^3\text{ m}^2/\text{seg}$ . Desplazamiento del cajón en función de la densidad del relleno. ....	16
Figura 10.	Viscosidad inicial del relleno $1\text{ m}^2/\text{seg}$ . Primeros 10 m. de desplazamiento del cajón en función de la densidad del relleno.....	16
Figura 11.	Geometría y detalle de la malla de elementos tetraédricos de los modelos 3D.	19
Figura 12.	Deformada de los cajones para el caso de rozamiento nulo ( $\mu = 0$ ) en .... $t = 21\text{seg}$ . ....	21
Figura 13.	Licuefacción instantánea. Movimiento de los cajones suponiendo los cajones 14 y 15 debilitados.....	22
Figura 14.	Licuefacción instantánea. Movimientos de los cajones suponiendo el cajón 23 debilitado. ....	23
Figura 15.	Distribución del flujo del relleno hidráulico con el cajón 23 con sustentación más débil. ....	24
Figura 16.	Distribución del flujo del relleno hidráulico con los cajones 14/15 con sustentación más débil. ....	25

Figura 17.	Foco en la mota norte. Desplazamientos de los cajones.....	28
Figura 18.	Foco en el cajón 15. Desplazamientos de los cajones.....	29
Figura 19.	Foco en el cajón 23. Desplazamientos de los cajones.....	30
Figura 20.	Foco en el cajón 15. Distribución del flujo del relleno hidráulico.....	31
Figura 21.	Foco en el cajón 23. Distribución del flujo del relleno hidráulico.....	31
Figura 22.	Foco en la mota norte. Distribución del flujo del relleno hidráulico.....	32
Figura 23.	Foco en el cajón 15.Desplazamientos de los cajones.....	34
Figura 24.	Foco en el cajón 23.Desplazamientos de los cajones.....	35
Figura 25.	Desplazamientos de los cajones. Foco en la mota norte.....	36
Figura 26.	Foco en el cajón 23. Distribución del flujo del relleno hidráulico.....	37
Figura 27.	Foco en el cajón 15. Distribución del flujo del relleno.....	37
Figura 28.	Distribución del flujo del relleno hidráulico con foco de licuefacción en la <b>mota norte</b> (lado este). ....	38
Figura 29.	Desplazamientos de los cajones. Foco en el cajón 23.....	39
Figura 30.	Desplazamientos de los cajones. Foco en el cajón 17.....	40
Figura 31.	Desplazamientos de los cajones. Foco en la mota norte.....	40
Figura 32.	Desplazamientos de los cajones. Foco en la mota norte.....	41
Figura 33.	Desplazamientos de los cajones. Foco entre las dos motas.....	41
Figura 34.	Posición de los distintos focos de licuefacción considerados.....	44
Figura 35.	Desplazamientos de los cajones. Dos focos de licuefacción. Primer foco en un punto situado a sur del extremo de la mota norte, punto P1. Segundo foco situado próximo al cajón 23 (iniciándose unos 4 sec más tarde). ....	44
Figura 36.	Desplazamientos de los cajones. Dos focos de licuefacción. Primer foco en el punto P2. Segundo foco situado próximo al cajón 23 (iniciándose unos 2sec más tarde). 45	45
Figura 37.	Desplazamientos de los cajones. Dos focos de licuefacción. Primer foco en el punto P3. Segundo foco situado próximo al cajón 23 (iniciándose unos 2 sec más tarde). 46	46
Figura 38.	Desplazamientos de los cajones. Dos focos de licuefacción. Primer foco en el punto P4. Segundo foco situado próximo al cajón 23 (iniciándose unos 2 sec más tarde). 46	46

<i>Figura 39.</i>	<i>Desplazamiento de los cajones en diferentes instantes de tiempo. Dos focos de licuefacción. Primer foco en el punto P3. Segundo foco situado próximo al cajón</i>	
		23      47
<i>Figura 40.</i>	<i>Frente de licuefacción con forma asimétrica.....</i>	48
<i>Figura 41.</i>	<i>Desplazamiento de los cajones en diferentes instantes de tiempo. Un solo foco de licuefacción con frente de propagación asimétrico situado entre los extremos de las dos motas.....</i>	49
<i>Figura 42.</i>	<i>Desplazamientos de los cajones. Un solo foco de licuefacción con frente de propagación asimétrico situado entre los extremos de las dos motas. ....</i>	50

## 1 INTRODUCCIÓN

La Autoridad Portuaria de Barcelona (APB) está interesada en conocer las causas que originaron la avería del Muelle de Prat el día 1 de Enero de 2007. El Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), consorcio entre la Generalitat de Cataluña y la Universidad Politécnica de Cataluña, ha desarrollado durante los últimos años formulaciones matemáticas y herramientas de cálculo específicas para resolver este tipo de problemas. APB y CIMNE tienen una gran experiencia en trabajar juntos en estudios y análisis de carácter científico técnico.

Por todo ello ambas instituciones establecen una colaboración para analizar las causas que originaron los grandes movimientos de los cajones 10 a 25 de la Fase 1 del Muelle del Prat del Puerto de Barcelona bien como consecuencia de proceso del relleno del trasdós de los mismos o bien por fallo local en el o en los cajones más solicitados.

El estudio tiene como objetivo obtener los movimientos de los cajones del muelle, utilizando el método de elementos finitos y de las partículas (PFEM, acrónimo de Particle Finite Element Method) desarrollado en el CIMNE. El PFEM es una técnica numérica muy potente y novedosa para tratar con problemas de interacción fluido-estructura que combina un método de partículas con el más clásico de elementos finitos. En el PFEM se modela tanto la estructura como el fluido con una formulación **lagrangiana**. Ello permite estudiar la evolución en el tiempo de cada punto de la estructura y del fluido, y considerar los efectos de interacción entre ambos.

El PFEM es un método especialmente adecuado para estudiar el efecto del flujo de fluidos viscosos en lámina libre sobre estructuras deformables, incluyendo los grandes movimientos en la estructura y en el fluido, y otros fenómenos relacionados como la rotura de olas, fenómenos de cavitación en el fluido, contacto friccional entre cuerpos flotantes o sumergidos, etc.

En las referencias [1-6] puede encontrarse una descripción más detallada del PFEM y algunas de sus aplicaciones. Más información sobre el PFEM, incluyendo videos de sus aplicaciones, puede verse en la página web [www.cimne.com/pfem](http://www.cimne.com/pfem).

En el Apéndice 1 se listan los miembros del equipo de CIMNE que han participado en el estudio.

## **2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO REALIZADO**

El estudio se inicia mediante la modelización bidimensional (2D) de una sección tipo del muelle averiado. Tras ello se realiza un estudio tridimensional (3D) de los movimientos de una alineación de referencia, que incluye los cajones afectados por el movimiento observado, así como una zona significativa del recinto donde se estaba efectuando el relleno, que considera las motas incorporadas durante el proceso constructivo, y de la dársena exterior.

Como paso previo al estudio con el método PFEM se han realizado unos sencillos cálculos para estimar las fuerzas ejercidas por el relleno y el agua sobre las paredes del cajón, así como la fuerza de subpresión para distintas características del relleno. Ello ha permitido evaluar los coeficientes de seguridad al deslizamiento estático, suponiendo diferentes valores de la subpresión y del coeficiente de rozamiento del cajón con la banqueta donde se apoya. Los resultados de este estudio se muestran en el Apéndice 2.

Es interesante destacar que el coeficiente de seguridad en varios de los casos considerados está muy próximo o es inferior a la unidad (Cuadro 1 del Apéndice 2). Ello da pie a pensar que una pequeña perturbación en las presiones del relleno, quizá producida por un deslizamiento parcial de parte del relleno sobre si mismo por desnivel de cotas, o por la licuefacción parcial del mismo, seguida de un deslizamiento de parte de la mota norte, haya inducido una fuerza dinámica adicional sobre la hilera de cajones provocando el desplazamiento de los mismos. Este desplazamiento ha podido provocar un efecto en cadena, extendiendo la licuefacción por el relleno de manera que el más próximo a los cajones, y en particular el material de la mota norte enfrentada con los cajones 14, 15 y 16, haya fluido junto con ellos, provocando el desembalse de una gran parte del relleno hacia el mar, arrastrando a su vez a los cajones.



Los estudios realizados con el PFEM, tanto en 2D como en 3D, toman como hipótesis de partida la licuefacción del material del relleno. Ello provoca de manera instantánea el deslizamiento de la zona del relleno licuefactada y un incremento de la subpresión en la base de los cajones. La licuefacción se ha modelado introduciendo un cambio en la viscosidad del relleno, desde un valor inicial alto (se simula un comportamiento cuasi rígido), hasta el valor de la viscosidad del agua, reproduciendo así el efecto de transformación de un relleno sólido a un fluido.

En el análisis 2D realizado se ha supuesto que el foco de inicio de la licuefacción en todos los casos se encuentra en una zona próxima a los cajones y el frente de licuefacción se propaga hacia la mota norte a una velocidad de 10 m/s. En el análisis 3D se han realizado diferentes hipótesis sobre la ubicación del foco de inicio de la licuefacción así como de la velocidad de propagación del frente de licuefacción en el relleno.

Por otra parte, y por razones del tiempo disponible para el estudio (6 semanas), en todos los casos analizados se ha supuesto que el fondo de la dársena es plano. Esta hipótesis es más favorable, en cuanto al menor movimiento de los cajones dentro de la dársena, que considerar una pendiente del fondo hacia el lado mar como ocurre en la realidad.

En relación a los valores de la densidad del relleno, se han estudiado diversos escenarios con valores desde  $1.600 \text{ Kg/m}^3$  hasta  $1.800 \text{ Kg/m}^3$ . Se ha estudiado también la influencia del coeficiente de rozamiento de los cajones en el comportamiento del fluido. En algunos casos se ha supuesto este valor constante e igual a 0.45. En otros, se ha supuesto una variación desde un valor de 0.6 (referencia del proyecto) en los momentos iniciales hasta 0.45, 0.25 e incluso 0.15 cuando el cajón se ha desplazado una cierta distancia (que se ha considerado en general de 10 m).

Debido también al tiempo disponible, el número de casos analizados en 2D y 3D ha sido limitado, no habiendo entrado en ningún momento en el análisis de las causas más intrínsecas que provocan la licuefacción inicial del relleno y la forma de progreso, si no más bien focalizando los análisis en el estudio de la cinemática del conjunto cajones-

relleno-mota inducida por los fenómenos antes mencionados, bajo los diferentes escenarios arriba descritos.

Los estudios realizados ponen de manifiesto que la posición dónde se ubica el foco de inicio de la licuefacción tiene una gran influencia en la forma final de la deformada de la hilera de cajones. Los resultados muestran que una vez que se inicia el movimiento en una zona del muelle, el flujo del relleno licuefactado por el interior del recinto se dirige hacia esa zona. Este efecto de orientación y de concentración del flujo aumenta la deformación en la zona donde se ha iniciado el movimiento, mientras que la reduce en gran medida en otras zonas de la alineación alejadas de ella.

Como consecuencia de lo anterior, no ha sido posible reproducir las dos protuberancias observadas en el movimiento real de la alineación de cajones, suponiendo un solo foco de licuefacción con una propagación homogénea (de tipo circular) del frente de licuefacción. Ante esta evidencia, se han considerado también otras situaciones creadas en base a dos focos de licuefacción con una cadencia determinada. El primer foco se ha ubicado en las proximidades de la mota norte con un frente de licuefacción que se propaga con una velocidad de 15m/seg; se han estudiado diferentes posiciones para este foco. El segundo foco se ha localizado en las proximidades del cajón 23 con una licuefacción se activa en el momento en que el frente producido por el primer foco llega a la línea de cajones considerada.

La aparición de un segundo foco de licuefacción se puede justificar como una consecuencia del movimiento solidario de la hilera de cajones que interactúan sobre el relleno circundante, lo que induce un movimiento dinámico que provoca una licuefacción cuasi-instantánea del relleno en las proximidades del cajón 23 (se ha supuesto una velocidad de avance del frente de licuefacción también de 15 m/seg en esa zona). Todo ello provoca a su vez el desplome de parte del material todo uno de la mota adyacente al extremo norte del recinto.

Bajo estas hipótesis calibrando la posición del primer foco de licuefacción, se ha logrado reproducir con bastante aproximación la forma real de la deformación de la hilera de

cajones considerada, con las dos protuberancias esperadas, y con una posición final de los cajones muy similar a la realmente producida en la realidad.

Asimismo se ha estudiado una hipótesis de propagación del frente de licuefacción de forma asimétrica. Para ello se ha supuesto la existencia de un solo foco situado en un punto intermedio entre los extremos de las motas norte y este. El frente de licuefacción tiene en esta hipótesis una forma de círculo truncado y se ha supuesto que la licuefacción progresa con una velocidad de 15 m/seg. Con estas hipótesis se ha logrado reproducir también con bastante aproximación el desplazamiento global de la hilera de cajones.

### **3 ANÁLISIS BIDIMENSIONAL**

El objetivo fundamental del estudio 2D ha sido evaluar la sensibilidad al deslizamiento del cajón ante variaciones de la densidad y viscosidad del relleno, del valor de la subpresión y del coeficiente de rozamiento.

La sección de estudio considerada se corresponde con un corte por la parte central de la mota norte próxima a los cajones 14-16. Los diferentes modelos geométricos utilizados se discretizan con mallas estructuradas de elementos triangulares de tres nodos. El número medio de nodos en los distintos modelos es de 9000 y el número de elementos alcanza los 17500 triángulos. El tiempo de cálculo de cada uno de los procesos numéricos (más de 15) superó la hora y media de CPU en un PC de altas prestaciones.

El estudio 2D supone una deformación prismática del dominio de análisis. Esta hipótesis es bastante aceptable para los cajones y el relleno adyacente, pero no tanto para la mota, dada su pequeña anchura con relación a la longitud del conjunto de los cajones afectados. Los resultados del estudio 2D han de considerarse, por tanto, una cota superior de los fenómenos realmente ocurridos en los momentos iniciales del deslizamiento.

No obstante, una vez que se ha movilizado la hilera de cajones, los efectos 3D del movimiento del relleno ejercen empujes irregulares sobre ella que favorecen el deslizamiento de zonas concretas de la misma. Este efecto no puede reproducirse en el estudio 2D realizado y puede ser la causa de la disposición bi-circular de los cajones tras la deformación de la alineación de partida.

En cualquier caso, el estudio 2D ofrece resultados muy interesantes tanto en cuanto a la estabilidad inicial de los cajones como a su capacidad de desplazarse por empuje del relleno licuefactado.

### 3.1 SUPUESTOS DE ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha estudiado la influencia en la respuesta de las variables:

Densidad del relleno = 1.600, 1.700, 1.800 y 1.900 Kg/m<sup>3</sup>.

Viscosidad cinemática inicial del relleno =  $10^{-6}$ , 1,  $10^3$  m<sup>2</sup>/s.

En los análisis realizados se tiene en cuenta tanto una licuefacción instantánea como una licuefacción progresiva que avanza desde el cajón hacia la mota y se propaga con una velocidad de 10 m/seg.

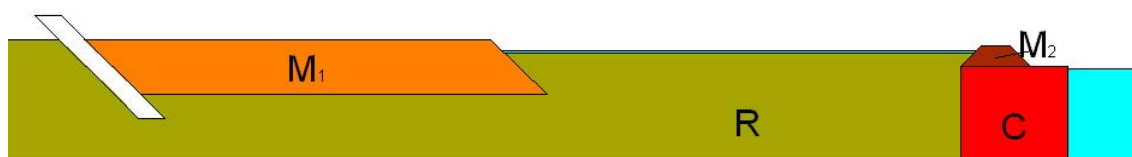


Figura 1. Geometría del modelo numérico para el análisis 2D.

En la figura 1 se muestra la geometría del modelo numérico utilizado, dónde los símbolos M, R y C representan las motas, el relleno y el cajón respectivamente. Se considera un coeficiente de rozamiento de 0,6 que se reduce a 0,15 cuando el movimiento horizontal del cajón alcanza 10 m. En el análisis se considera una subpresión media entre los valores obtenidos cuando sólo actúa el agua en ambos lados del cajón y cuando se considera que el relleno está licuefactado.

La porción de mota que se desploma tiene una longitud de 70 m., una profundidad de 9,5 m. y una densidad constante de 2.000 Kg/m<sup>3</sup> (todo ello es equivalente a un desplome de 70.000 ton. del material de la mota cuando el relleno se licuefacta).

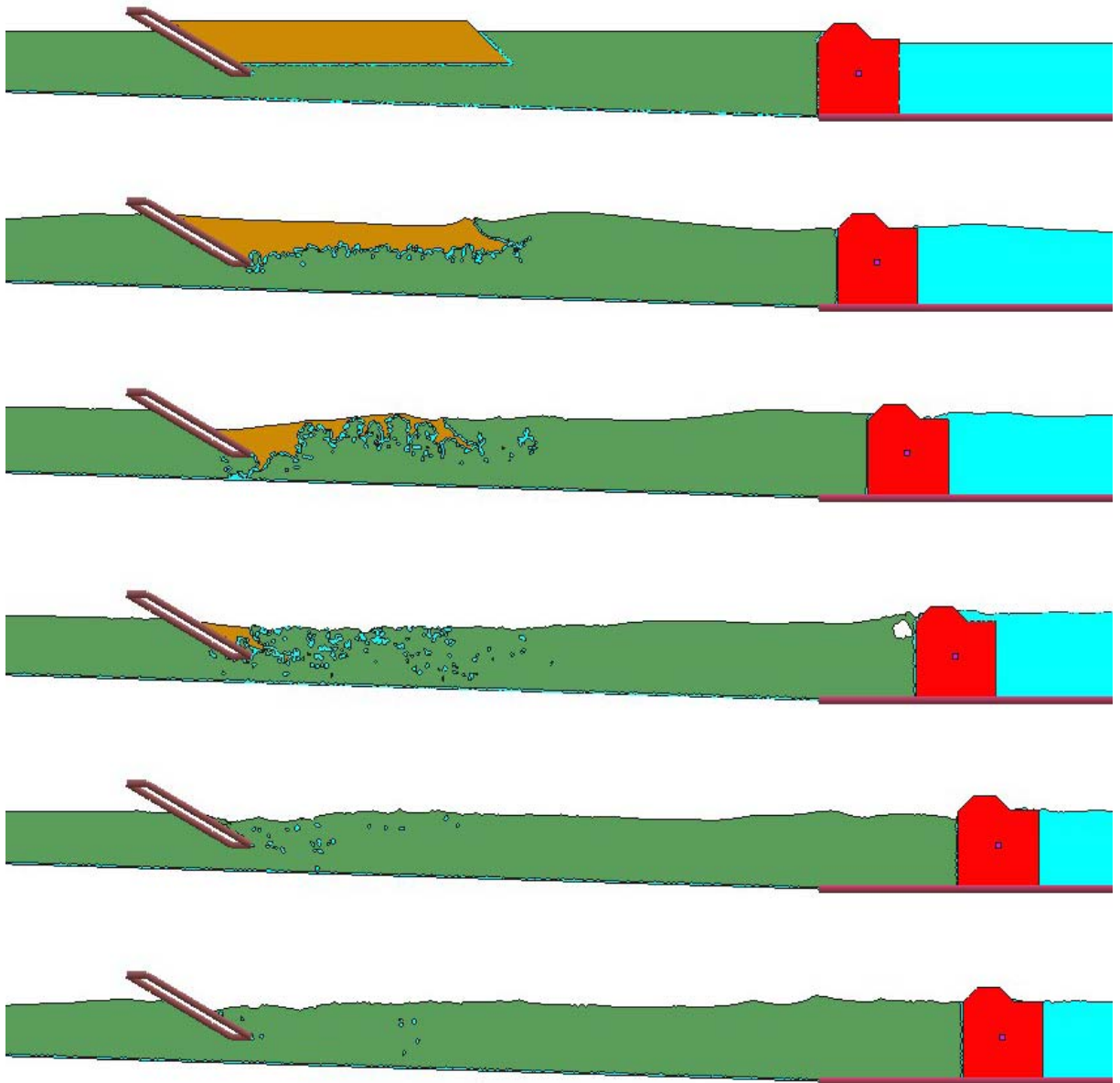


Figura 2. Desplazamiento del cajón en varios instantes durante 32s. ( $\rho_M=2000\text{Kg/m}^3$ ,  $\rho_R=1600\text{Kg/m}^3$ )

En la figura 2 se muestra la evolución del desplazamiento del cajón en distintos tiempos del análisis realizado.

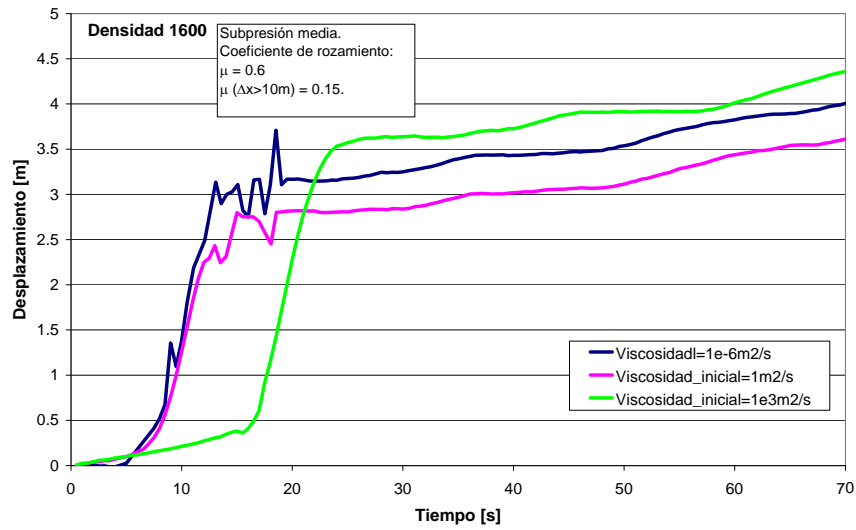


Figura 3. Densidad 1.600 kg/m³. Desplazamiento del cajón para diferentes valores de la viscosidad del relleno.

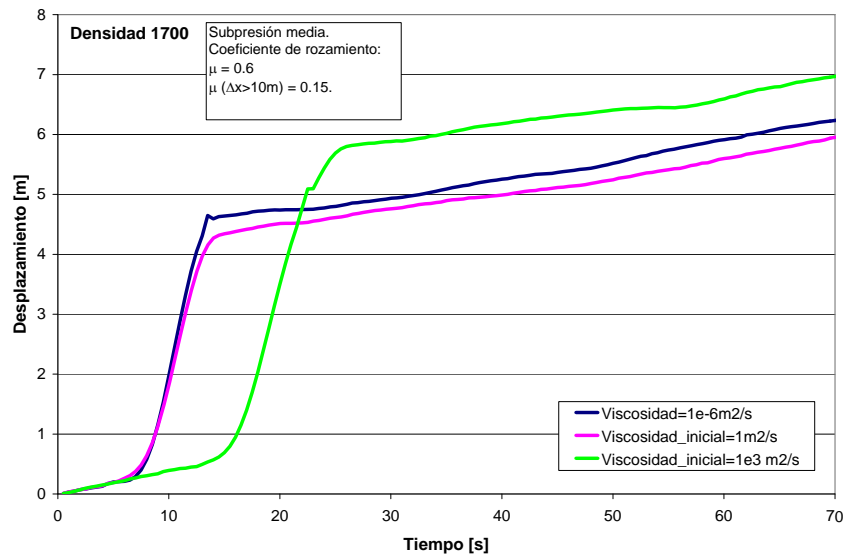


Figura 4. Densidad 1.700 kg/m³. Desplazamiento del cajón para diferentes valores de la viscosidad del relleno.

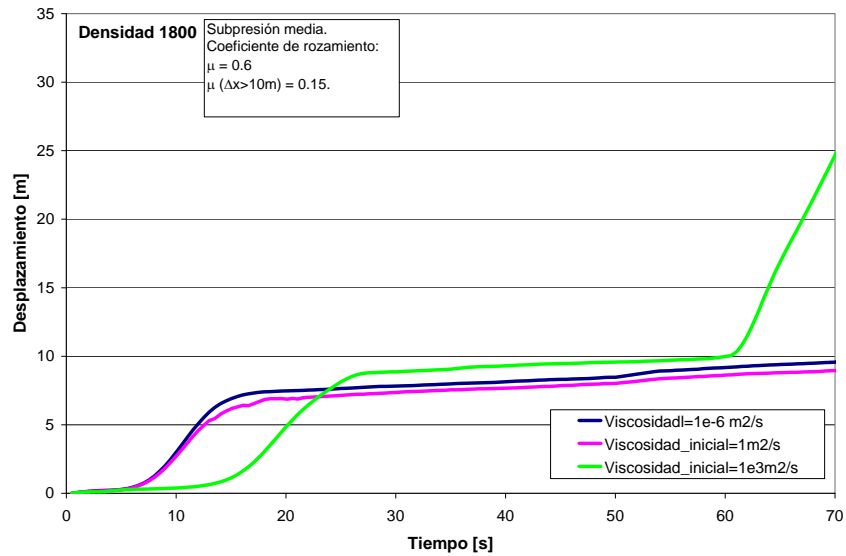


Figura 5. Densidad 1.800 kg/m³. Desplazamiento del cajón para diferentes valores de la viscosidad del relleno.

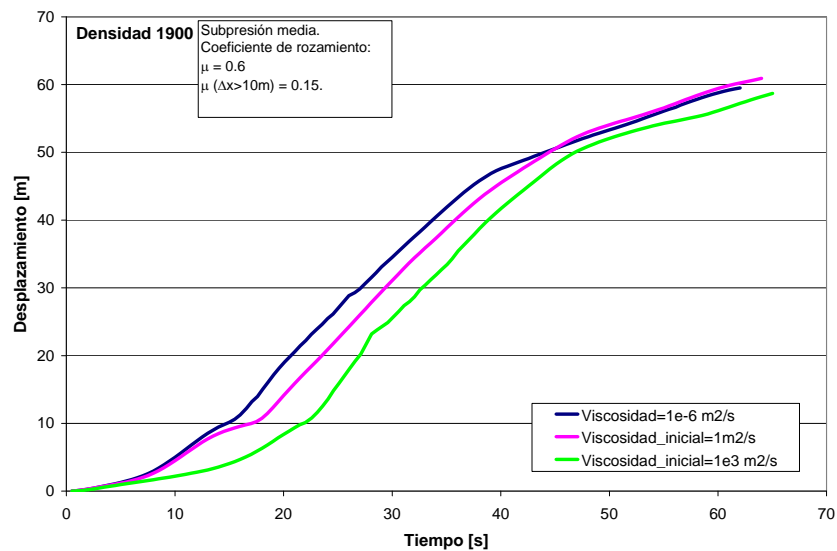


Figura 6. Densidad 1.900 kg/m³. Desplazamiento del cajón para diferentes valores de la viscosidad del relleno.



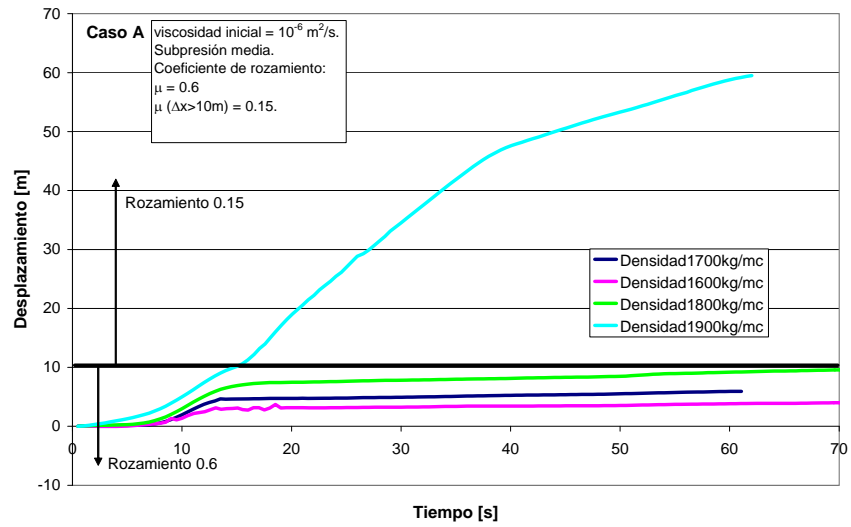


Figura 7. Viscosidad del relleno constante de  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$ . Desplazamiento del cajón en función de la densidad del relleno.

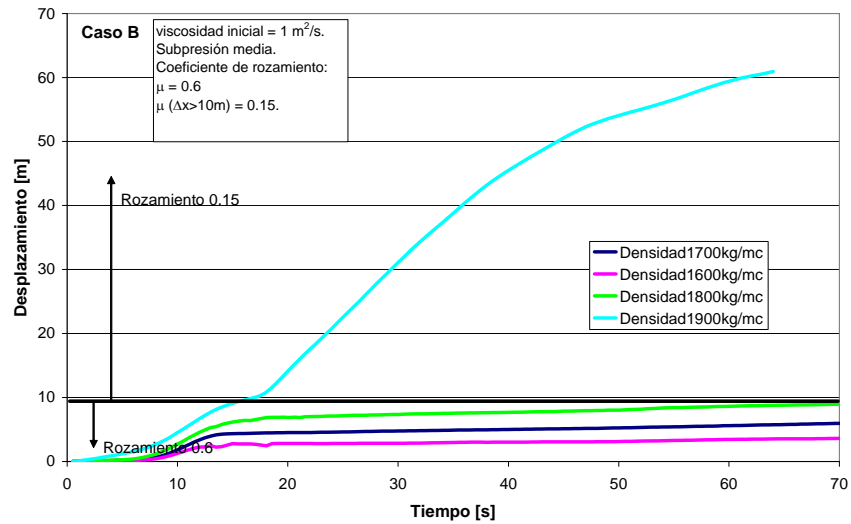


Figura 8. Viscosidad inicial del relleno  $1 \text{ m}^2/\text{seg}$ . Desplazamiento del cajón en función de la densidad del relleno.

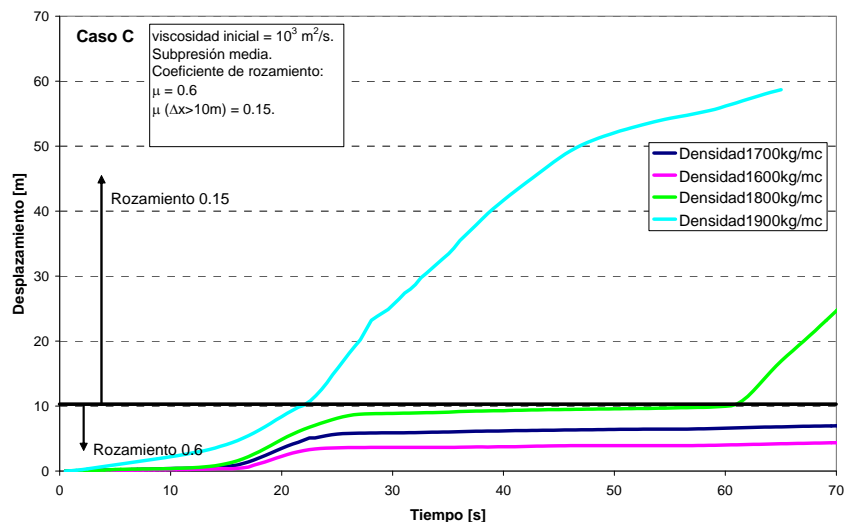


Figura 9. Viscosidad inicial del relleno de  $10^3 \text{ m}^2/\text{seg}$ . Desplazamiento del cajón en función de la densidad del relleno.

En las figuras 3-9 se muestra la influencia de la viscosidad y de la densidad del material del relleno licuefactado en el movimiento de los cajones en distintos instantes considerados. En la figura 10 se amplifican los resultados presentados en la figura 8 para poder apreciar mejor la variación del desplazamiento en los primeros pasos de tiempo.

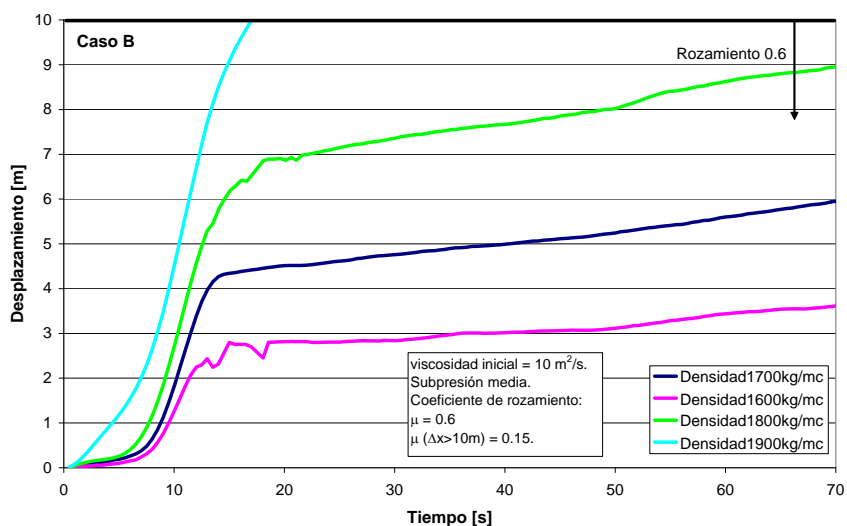


Figura 10. Viscosidad inicial del relleno  $1 \text{ m}^2/\text{seg}$ . Primeros 10 m. de desplazamiento del cajón en función de la densidad del relleno.

### 3.2 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS 2D

De los resultados obtenidos en los estudios realizados en 2D se concluye:

- 1) La viscosidad del relleno no es muy relevante para el movimiento del cajón. Por el contrario los movimientos del cajón se incrementan sustancialmente al aumentar el valor de la densidad del relleno en particular es destacable que un aumento de la densidad de 1.600 a 1.800 kg/m<sup>3</sup> (un 12.5%) provoca un incremento en el desplazamiento del cajón de 4.5 a 7 m. (un 55.5%) en los primeros 20 segundos como se puede ver en la figura 10.
- 2) En todos los casos estudiados, la licuefacción del terreno y el desplome de la mota inducen el movimiento del cajón. La intensidad de este movimiento depende de los valores de la densidad del relleno y del material de la mota.
- 3) El desplazamiento máximo del cajón ( $D_{max}$ ) para los primeros 60 segundos oscila entre 3,6 m. y 61 m. para los casos más y menos desfavorables a dicho movimiento, que corresponden a:

*Caso más desfavorable:*  $D_{max}=61$  m,  $\rho_{relleno}=1900$  Kg/m<sup>3</sup>.

*Casos menos desfavorable:*  $D_{max}=3.6$  m,  $\rho_{relleno}=1600$  Kg/m<sup>3</sup>.

- 4) Al considerar sólo la subpresión hidrostática (con  $\rho_{relleno}=1.600$  Kg/m<sup>3</sup>,  $\mu=0.6$ ) se produce también un movimiento del cajón aunque de menor intensidad.

## 4 ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL

Los estudios 3D se han realizado con dos códigos de cálculo diferentes basados en el PFEM, ambos desarrollados en CIMNE, con objeto de asegurar y validar la calidad de los resultados obtenidos.

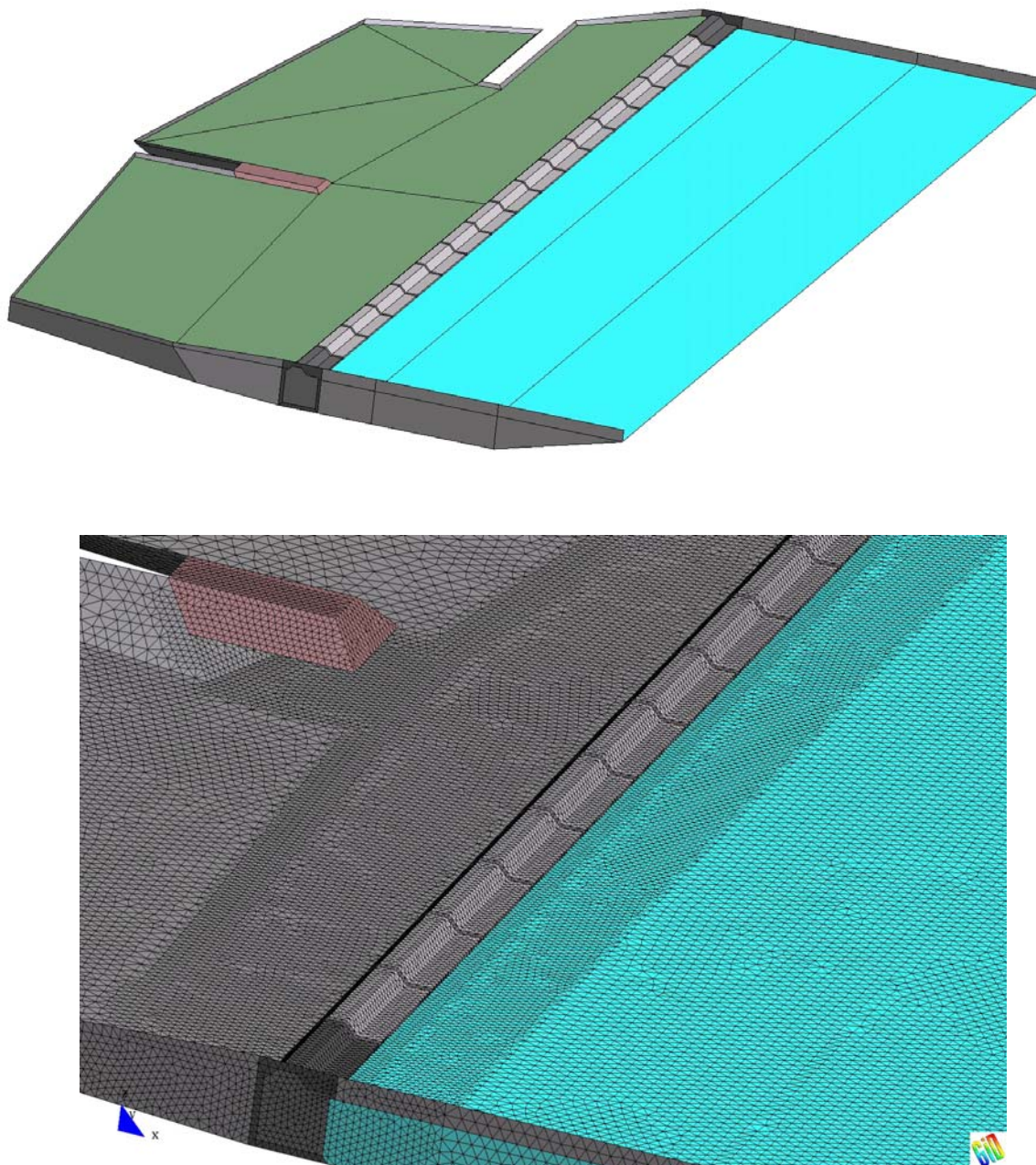
La selección de la zona de estudio ha estado condicionada por motivos del tamaño del modelo numérico a resolver en 3D y por el tiempo disponible para realizar el estudio. Los elementos utilizados para el análisis 3D son tetraedros de 4 nodos.

El estudio 3D se inició con el análisis de una zona prismática de 40 m. de ancho (equivalente a la longitud de un cajón) con el fin de calibrar los parámetros del cálculo. Una vez finalizada esta etapa de calibración se procedió al análisis de varios escenarios de fallo, considerando dominios de la zona del agua en la dársena de distinto tamaño.

En la figura 11 se muestra la zona de estudio para el análisis 3D que incluye la mayor parte del relleno que ha deslizado durante la rotura del muelle. En la misma figura también se muestra un detalle (mota, relleno, cajones y mar exterior) de la malla de elementos usados para representar el dominio de análisis.

En el primer código usado el dominio de análisis es más global y se discretiza con una malla no estructurada de 2 millones de elementos tetraédricos. En el segundo el dominio analizado es más pequeño y se discretiza con más detalle, con una malla de 1,8 millones de elementos. El tiempo de cálculo de cada uno de los procesos numéricos asociados (más de 30) superó en media los 5 días de CPU en un PC de altas prestaciones.

En todos los casos las hipótesis de partida, como ya se ha mencionado con anterioridad, consideran la licuefacción del relleno y el desplome progresivo de parte del material de la mota ( $\approx 670.000$  ton.) sobre el propio relleno, así como el desembalse del material del relleno durante deslizamiento de los cajones hacia la dársena.



*Figura 11. Geometría y detalle de la malla de elementos tetraédricos de los modelos 3D.*

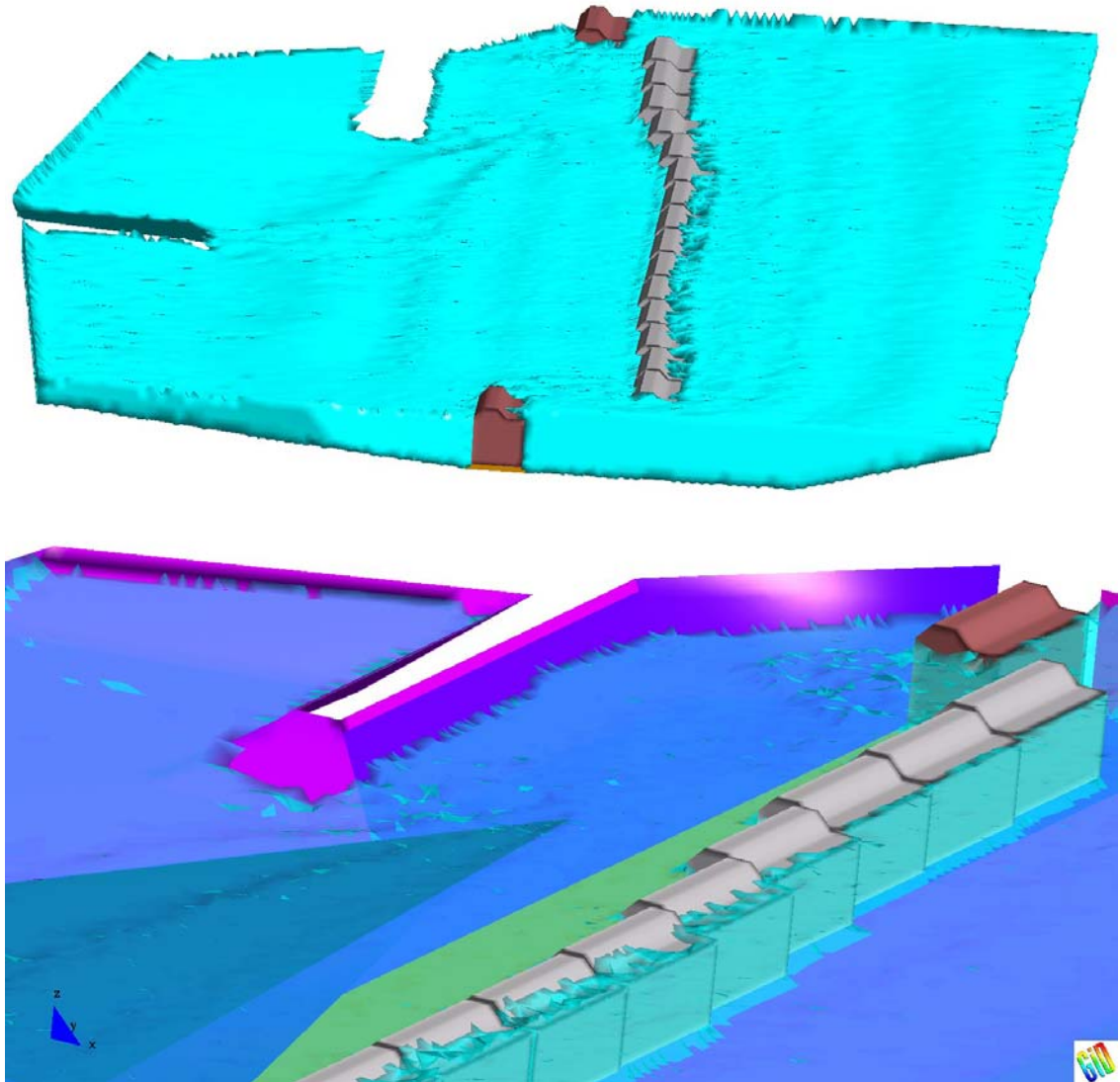
#### 4.1 ANALISIS 3D. ESCENARIO 1. Licuefacción instantánea.

Los cálculos previos realizados ponen de manifiesto que los cajones con los parámetros iniciales proporcionados por los responsables del estudio en el Puerto de Barcelona, no se mueven si no se produce la licuefacción del relleno. Por ello, el primer supuesto que se realiza en este trabajo es que la porción de relleno que se movilizó durante la avería (de acuerdo con la información gráfica disponible), está licuefactado.

La licuefacción del relleno hidráulico provoca la caída de la mota norte, debido a las densidades diferentes del material, y genera una ola que avanza hacia la línea de cajones. Se considera que la mota norte tiene forma prismática con sección trapezoidal y es de un material con densidad  $\rho = 2.000 \text{ Kg/m}^3$ . Se considera que el material del relleno tiene una densidad de  $1.600 \text{ Kg/m}^3$ . Se usan dos modelos que consideran dos rozamientos claramente diferentes. Uno constante de 0,45 en todo el dominio espacial y temporal y otro que disminuye desde 0,45 hasta 0,15 cuando el movimiento del cajón supera los 10 m. (aproximadamente el ancho libre de la banqueta de apoyo).

Los análisis iniciales de tanteo realizados con la hipótesis de licuefacción instantánea de todo el relleno pusieron de manifiesto en ambos modelos de rozamiento, un movimiento de la alineación de los cajones suave, es decir, sin las focalizaciones o protuberancias que en la realidad se pueden observar en las proximidades de los cajones 23 y 15. Un estudio adicional con rozamiento nulo dio como resultado un movimiento prácticamente de traslación de toda la hilera de cajones, como se puede ver en la figura 12.

Esta circunstancia condujo a pensar en unos mecanismos alternativos de fallo más locales o localizados, es decir, en modelos que presuponían unas condiciones de apoyo más débiles para los cajones más afectados por el movimiento real detectado.



*Figura 12. Deformada de los cajones para el caso de rozamiento nulo ( $\mu = 0$ ) en  $t = 21\text{seg.}$*

Por ello en primer lugar se debilitó la sustentación de los cajones 14 y 15, es decir, para estos cajones se consideró un coeficiente de rozamiento menor y que cae de forma brusca con el movimiento pasando de 0,45 a 0.10 manteniéndose constante a partir de entonces. En segundo lugar se debilitó el apoyo del cajón 23 en las mismas condiciones.

En los gráficos que se muestran a continuación se representa la posición de los cajones para diferentes instantes en cada uno de los casos descritos. La figura 13 da una visión general del movimiento de los cajones para el caso en que se disminuye el rozamiento



en los cajones 14 y 15. Se observa que esta hipótesis provoca un movimiento mayor de estos cajones mientras que el movimiento del cajón 23 queda lejos de los 40 m. detectados en la realidad. Por otra parte se produce un movimiento excesivo del cajón 10 (extremo izquierdo del dominio) que no coincide con la realidad observada.

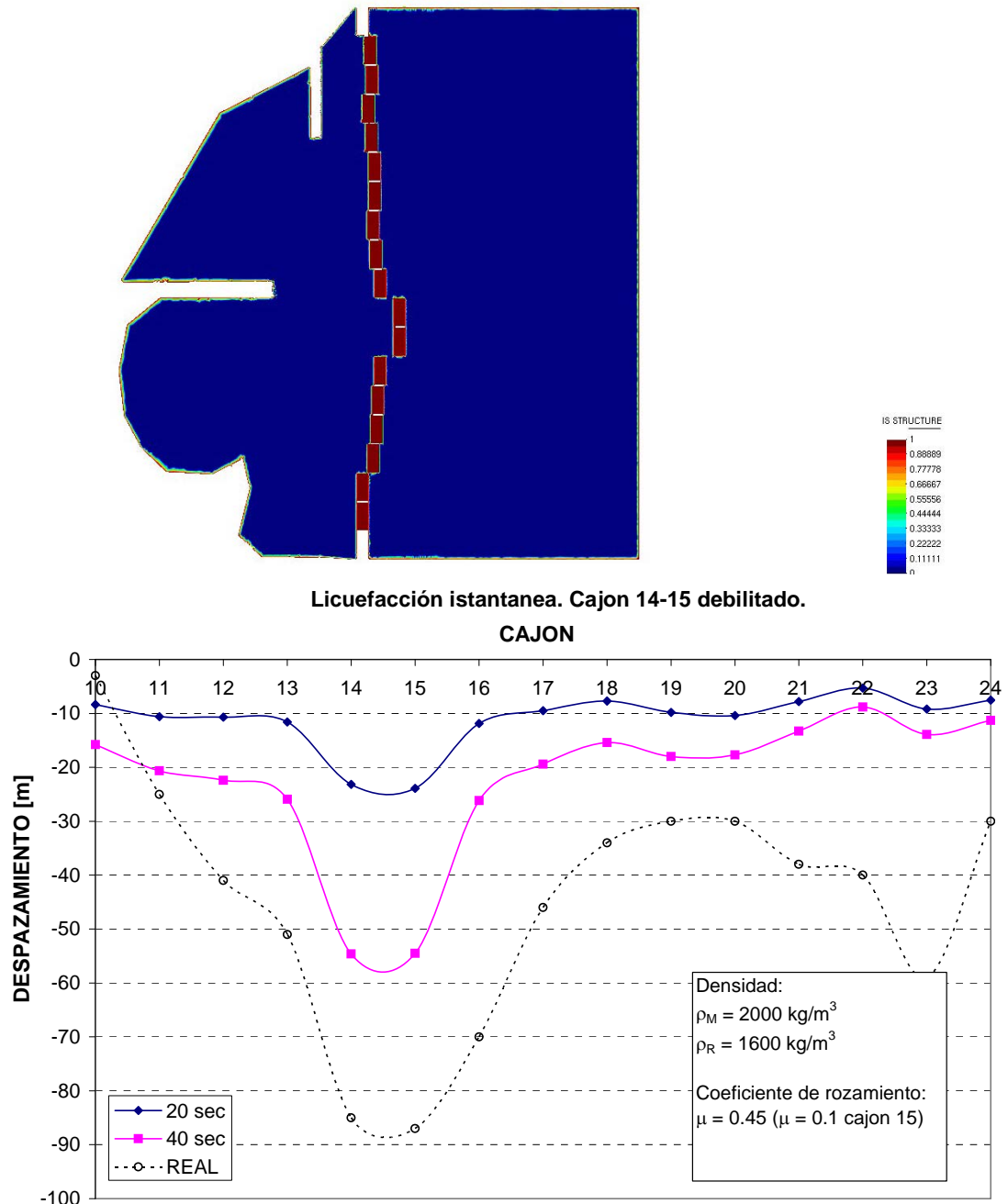


Figura 13. Licuefacción instantánea. Movimiento de los cajones suponiendo los cajones 14 y 15 debilitados.



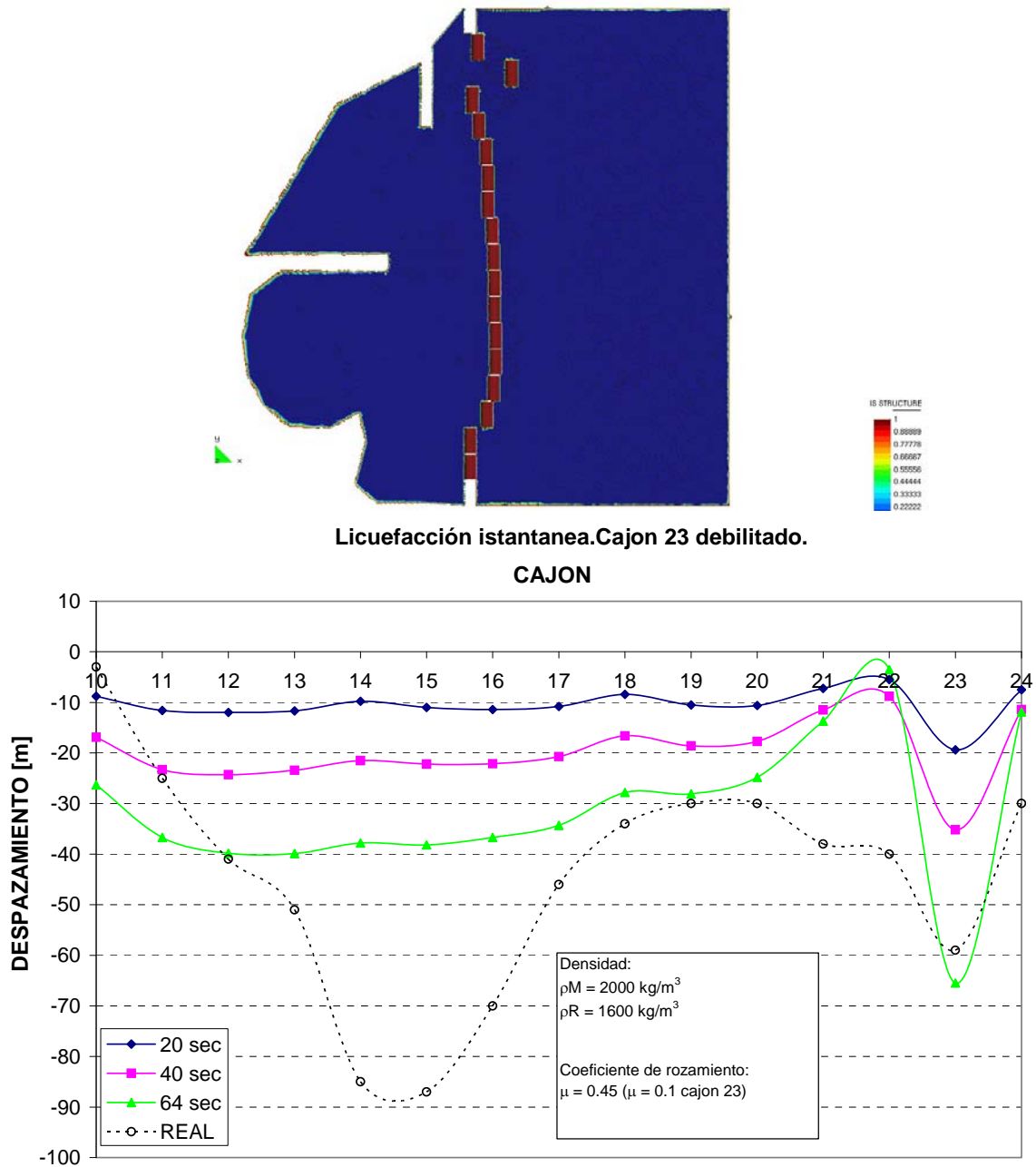


Figura 14. Licuefacción instantánea. Movimientos de los cajones suponiendo el cajón 23 debilitado.

En el gráfico de la figura 14 se muestran los resultados obtenidos para la hipótesis en que el cajón 23 tenga un coeficiente de rozamiento menor. Puede observarse que el movimiento del cajón 23 crece mucho más rápidamente que el resto. Y aunque se

aprecia una cierta similitud con el mecanismo de daño real en esta zona, no se reproduce sin embargo la protuberancia observada frente a la mota norte, es decir en la zona de los cajones 14-15.

Las figuras 15 y 16 muestran la dirección del flujo del relleno hidráulico. Es particularmente interesante el hecho de que el material licuefactado tiene una acusada tendencia a dirigirse hacia la zona donde los cajones ceden primero. Al moverse los cajones, el material de relleno se moviliza, les acompaña y el nivel de relleno desciende localmente.

Esto provoca un “efecto llamada” en el material de relleno, fenómeno que se reproduce en cadena. Este flujo genera a su vez un empuje adicional sobre los cajones, que se desplazan aún más. Por otro lado, también se aprecia en la figura mencionada la generación de una ola en la dársena que, una vez formada, viaja más rápido que los cajones y se desprende de ellos. El tiempo de movimiento de los cajones, por tanto, está desacoplado del periodo de cualquier ola que se genera en la dársena.

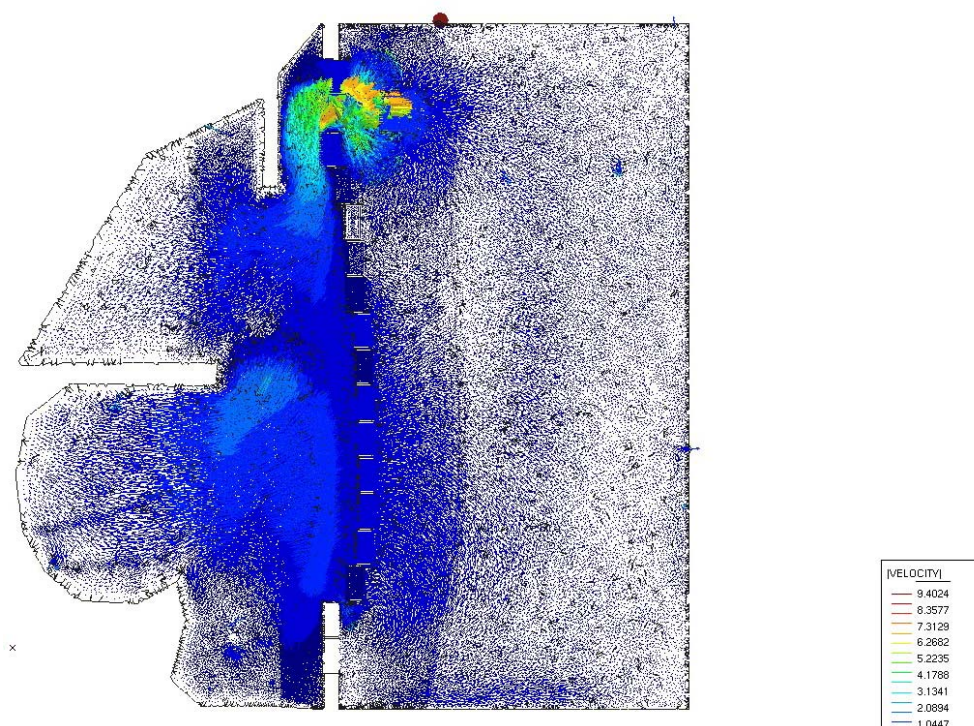
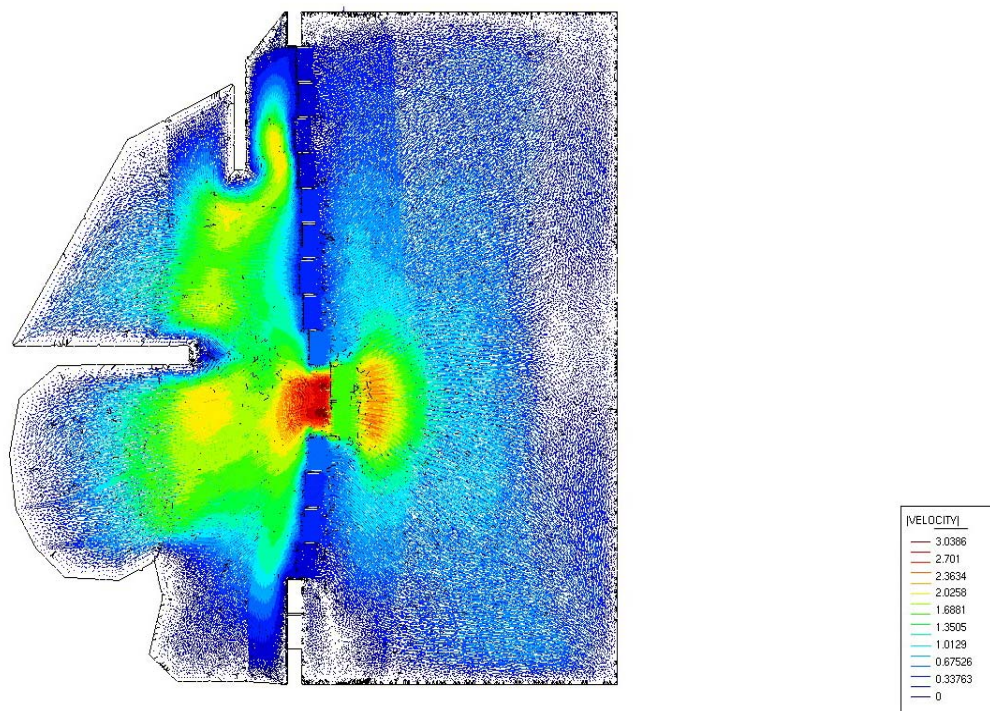


Figura 15. Distribución del flujo del relleno hidráulico con el cajón 23 con sustentación más débil.



*Figura 16. Distribución del flujo del relleno hidráulico con los cajones 14/15 con sustentación más débil.*

En resumen, la hipótesis de que exista un desplazamiento inicial del cajón 23 por fallo en el coeficiente de rozamiento de la base o por un exceso de empuje en esta zona parece que puede descartarse.

#### **4.2 ANALISIS 3D. ESCENARIO 2. Licuefacción progresiva. Un foco de licuefacción.**

En un estudio más profundo en busca de otros procesos dinámicos que expliquen la situación final de los cajones, se planteó un escenario que considera una licuefacción progresiva del relleno hidráulico.

Partiendo de una condición de relleno hidráulico sólido, o casi-sólido, se supone una licuefacción progresiva que se propaga desde un “foco de licuefacción” en anillos concéntricos. Cuando el frente de licuefacción alcanza una zona del relleno o incluso las motas de arena y del material todo-uno, la mota empieza a caer.

En este escenario se han considerado diferentes supuestos con densidades de relleno hidráulico de  $1.600 \text{ Kg/m}^3$  y  $1.800 \text{ Kg/m}^3$ , así como coeficientes de rozamiento de 0,45 y 0,6 fijos o variables de acuerdo con el movimiento de los cajones. Asimismo se han considerado diferentes opciones para la posición del foco de inicio de la licuefacción a fin de simular los casos más plausibles. Por último se han considerado diferentes velocidades de propagación ( $v_L$ ) del “frente de licuefacción” desde  $v_L = 15 \text{ m/seg}$  hasta  $v_L=100 \text{ m/seg}$ .

Cabe decir que tanto las velocidades de propagación del frente de licuefacción como la forma circular del mismo son hipótesis sobre el desarrollo del fenómeno real de la rotura del relleno. En otras palabras, el modelo se limita a reproducir las consecuencias de la licuefacción aceptando un cierto modelo de progreso de la misma por el relleno sin entrar en las causas del inicio de la misma.

De la misma manera se acepta que el rozamiento dinámico entre los cajones y la banqueta de apoyo sea menor que el rozamiento estático, y que en el momento en que los cajones se encuentran fuera de la misma el rozamiento baja considerablemente (típicamente de 0.6 a 0.4).

#### **4.2.1 Rozamiento constante.**

Densidad del relleno hidráulico:  $1.600 \text{ Kg/m}^3$ .

Focos de licuefacción: mota norte (centrado), cajón 15 y 23

Velocidad de propagación de la licuefacción:  $15 \text{ m/seg}$ .

Coefficiente de rozamiento:  $0.45$  constante.

Subpresión: media entre la hidrostática y la equivalente del relleno licuefactado.

A continuación se presentan los resultados más relevantes obtenidos en los análisis realizados para los tres supuestos descritos.

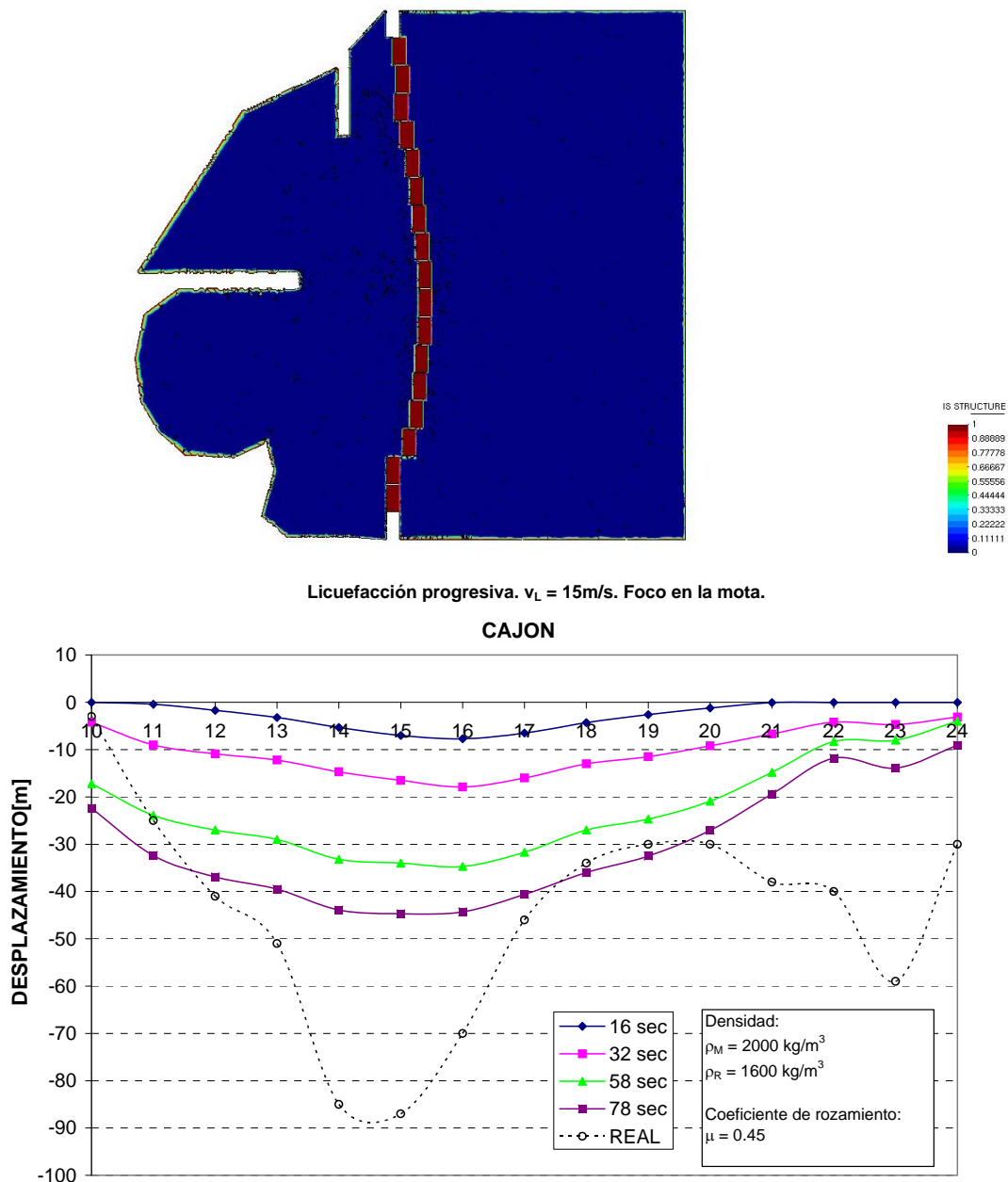


Figura 17. Foco en la mota norte. Desplazamientos de los cajones.

**Foco en la mota norte** ( $v_L=15\text{m/s}$ ) (Figura 17): puede observarse como el movimiento de los cajones crece formando una protuberancia central (cajones 14-17) similar a la observada en la realidad, si bien con movimientos importantes en los extremos de la alineación (cajón 10) poco compatibles con el daño real observado. En cualquier caso el efecto del confinamiento de la **mota este** y la mayor altura del relleno en esa zona provocan una cierta protuberancia en el cajón 23 similar a la observada en la realidad.

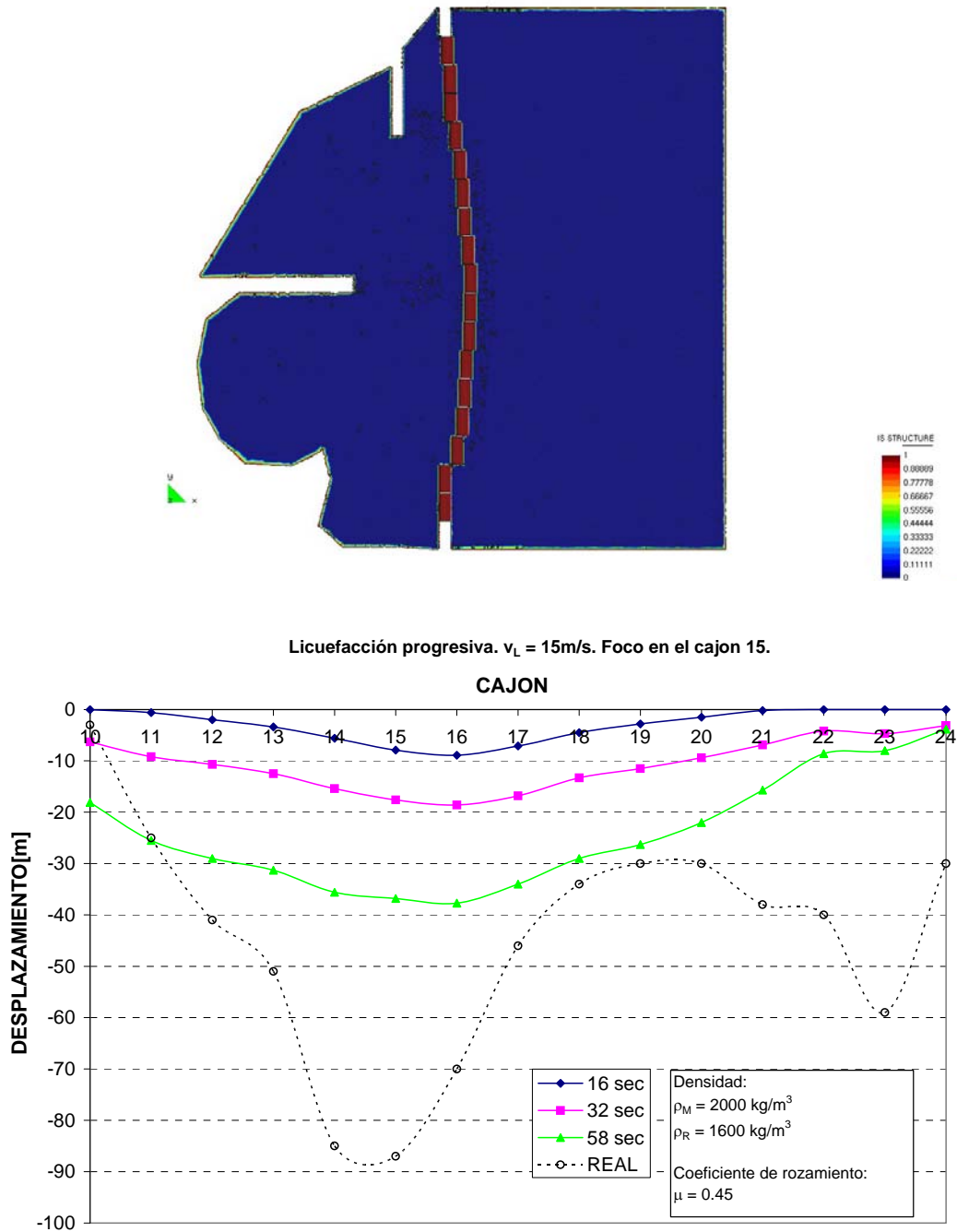


Figura 18. Foco en el cajon 15. Desplazamientos de los cajones.

**Foco en el cajon 15** ( $v_L=15\text{m/s}$ ) (Figura 18): la situación resultante es similar a la obtenida cuando la licuefacción se inicia en la mota norte, quizá con unos valores de los desplazamientos ligeramente mayores (nótese que la comparación debe realizarse en tiempos equivalentes).



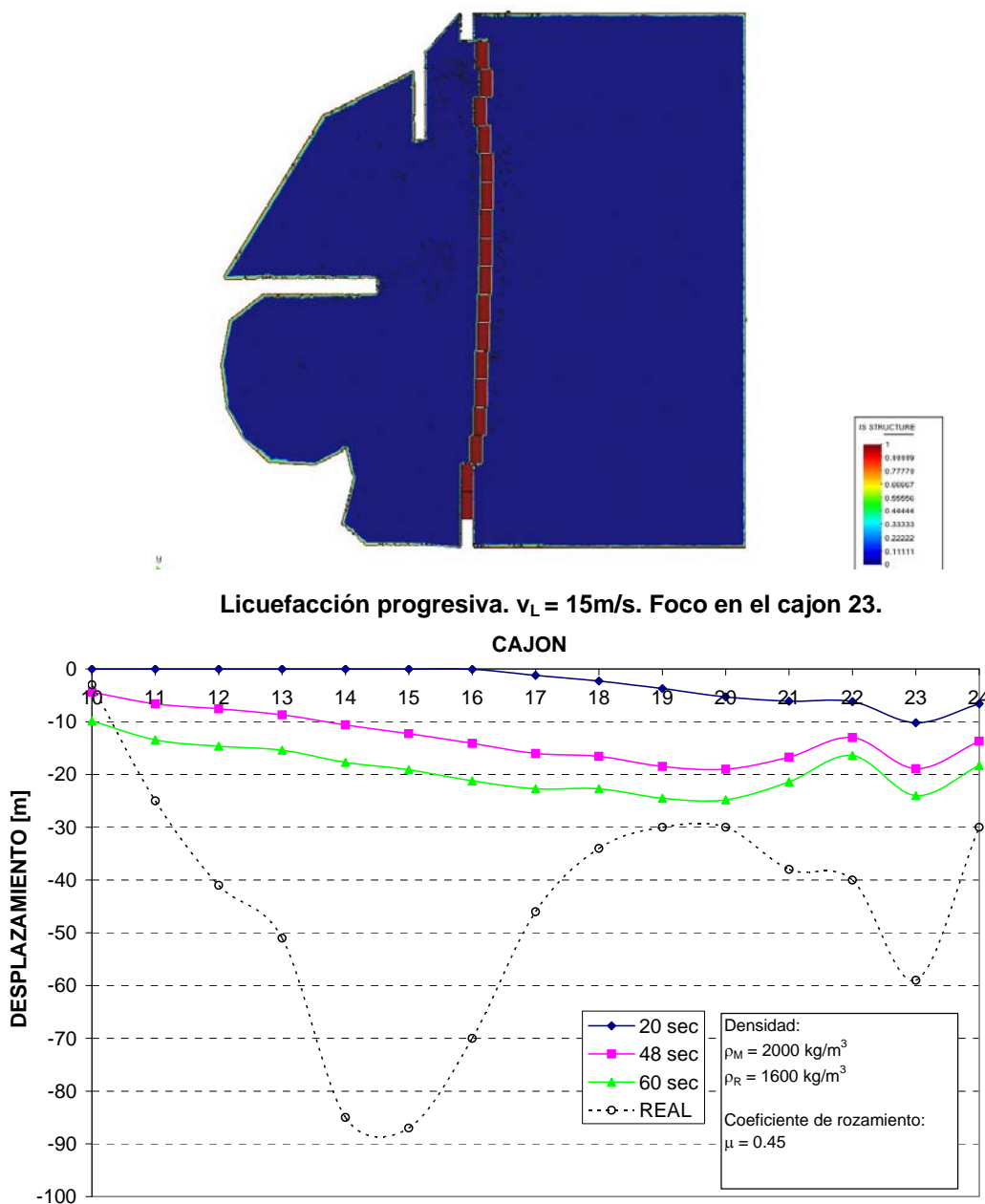


Figura 19. Foco en el cajón 23. Desplazamientos de los cajones.

**Foco en el cajón 23** ( $v_L=15\text{m/s}$ ) (Figura 19): se observa que el movimiento de los cajones alcanza con el tiempo dos valores máximos muy próximos, tanto en magnitud como en posición espacial. Aunque se reproduce la protuberancia en las proximidades del cajón 23 no se alcanza un mecanismo equivalente en los cajones frente a la mota norte (cajones 14-15). El valor máximo del desplazamiento en la zona más central se desplaza hacia el foco y es inferior al obtenido para las otras situaciones analizadas.



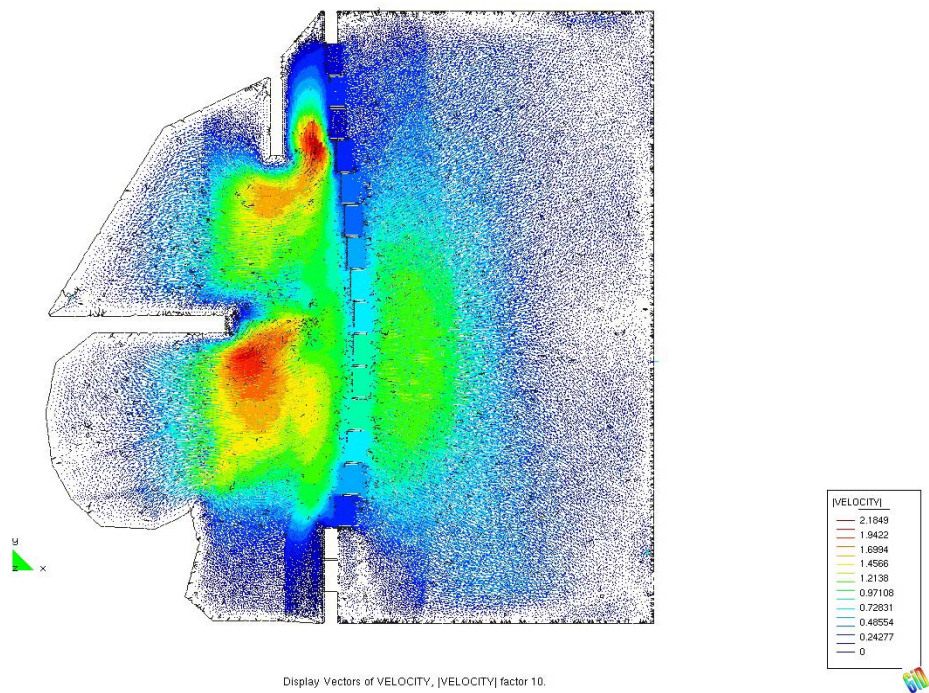


Figura 20. Foco en el cajón 15. Distribución del flujo del relleno hidráulico.

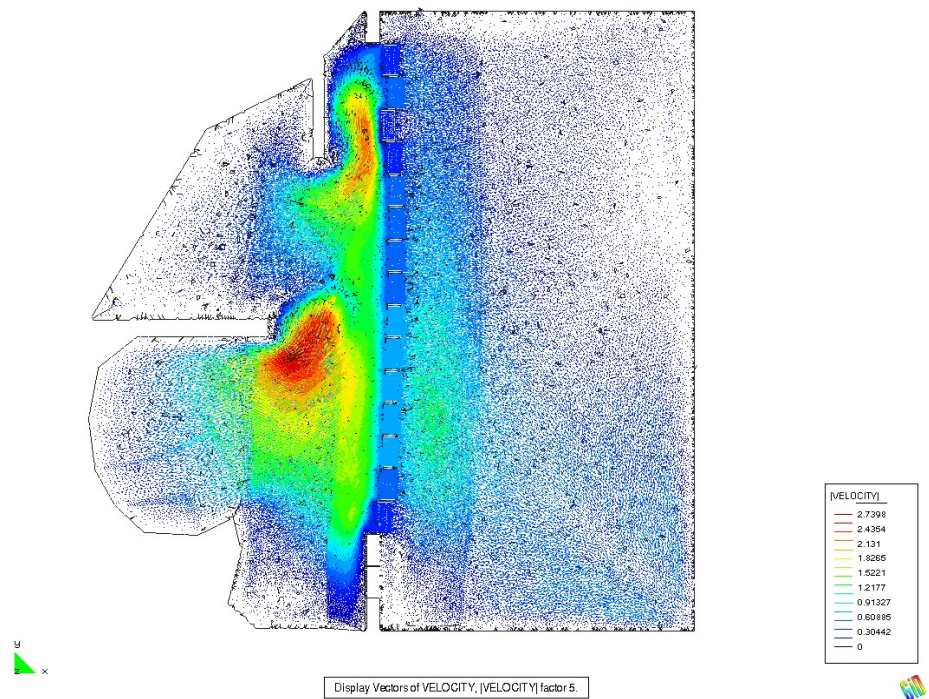
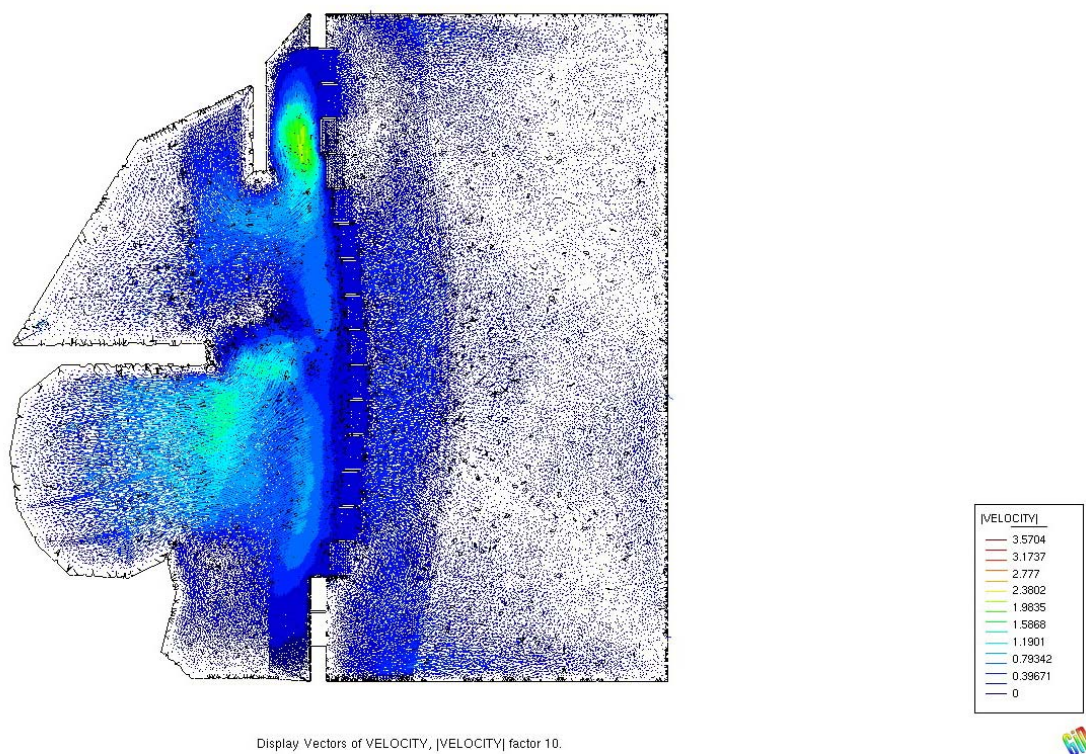


Figura 21. Foco en el cajón 23. Distribución del flujo del relleno hidráulico.



*Figura 22. Foco en la mota norte. Distribución del flujo del relleno hidráulico.*

En las figuras 20 a 22 se muestran los flujos del relleno hidráulico en los tres casos de análisis considerados. En las figuras puede apreciarse que el flujo es muy parecido en los tres casos, principalmente debido a que la alineación de cajones no presenta discontinuidades que activen el “efecto llamada” anteriormente descrito.

En cualquier caso, cabe destacar que el relleno hidráulico más alejado de los cajones, así como el material de la mota norte, se dirigen hacia los focos de licuefacción considerados (cajones 15 y 23) o, en el caso del foco en la mota norte, hacia los cajones más cercanos.

#### **4.2.2 Rozamiento variable. Densidad del relleno hidráulico: 1600 Kg/m<sup>3</sup>**

Focos de licuefacción: cajón 15, cajón 23, **mota norte** (lado este).

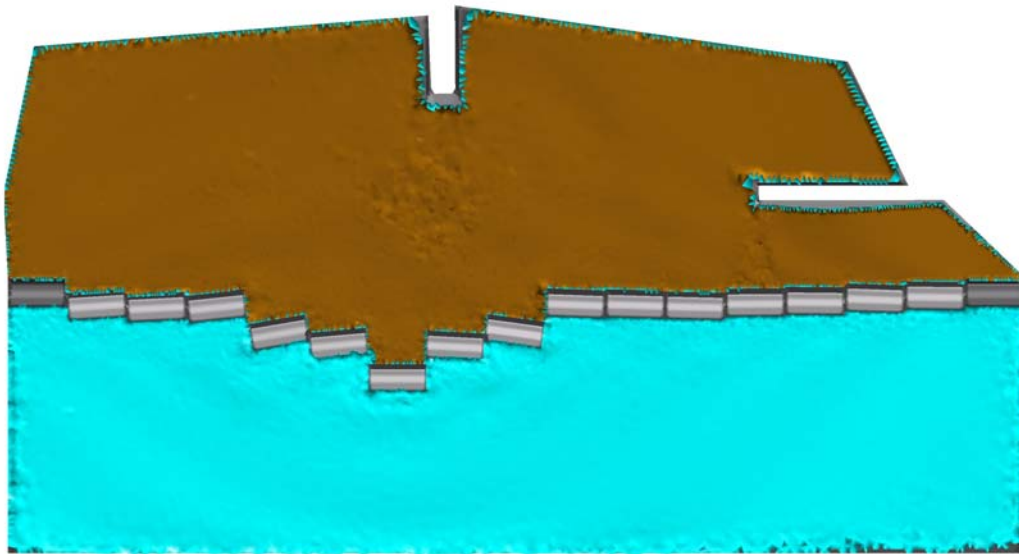
Velocidad de propagación de la licuefacción: 15 m/s.

Coeficiente de rozamiento: 0,45.

Coeficiente de rozamiento tras 10 m. de desplazamiento: 0,15.

Subpresión: equivalente a la del relleno licuefactado.

A continuación se presentan los resultados más relevantes obtenidos en los análisis realizados para los tres supuestos descritos.



Licuefacción progresiva.  $v_L = 15\text{m/s}$ . Rozamiento variable. Foco en el cajón 15.

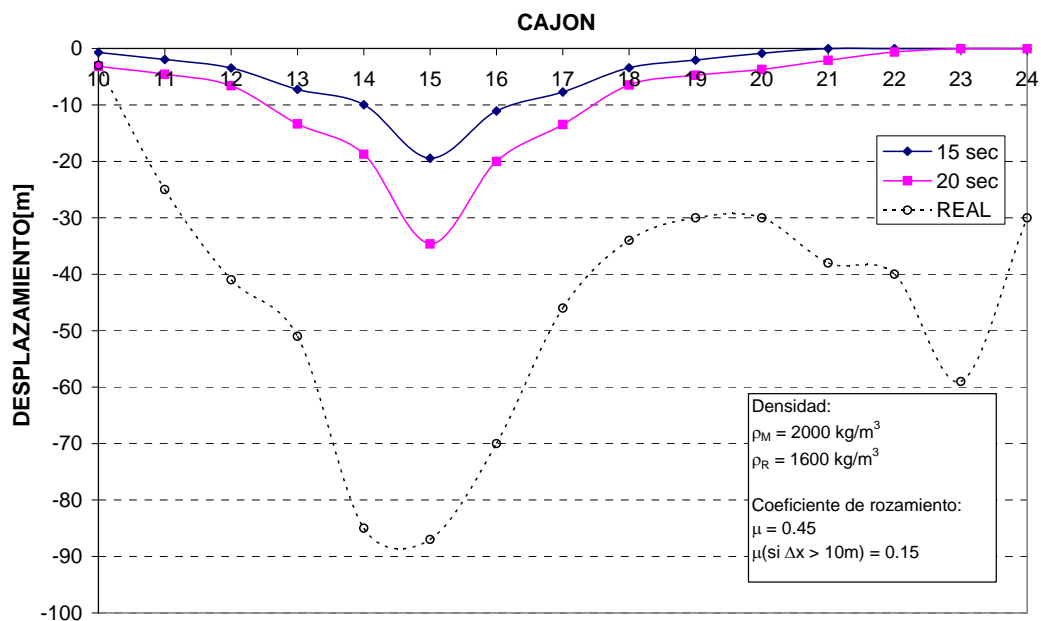
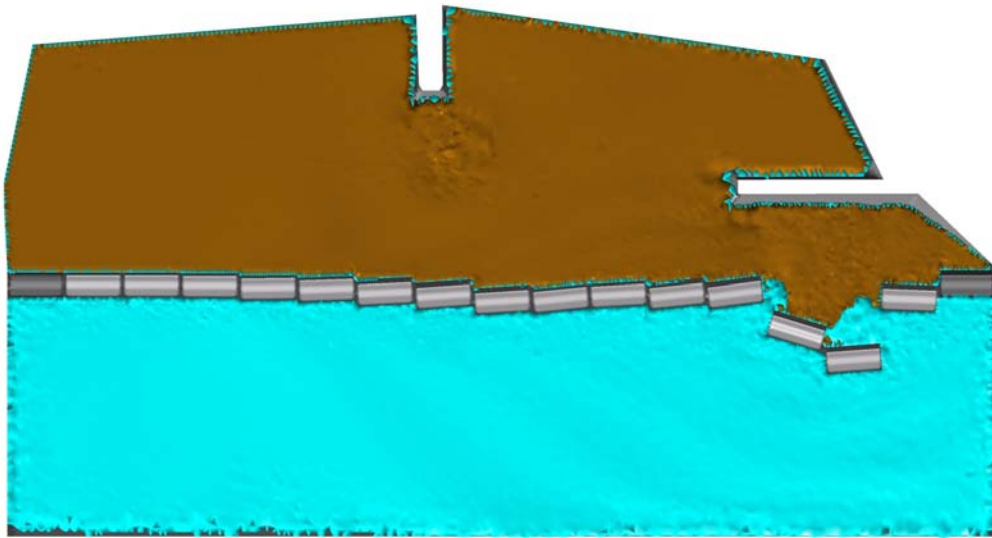


Figura 23. Foco en el cajón 15. Desplazamientos de los cajones.

**Foco en el cajón 15** ( $v_L=15\text{m/s}$ ) (Figura 23): puede observarse como se genera una protuberancia alrededor del cajón 15 pero en el tiempo de cálculo estudiado no aparece un efecto equivalente alrededor del cajón 23. Al iniciarse la salida del recinto del material de relleno por la zona próxima al cajón 15, se detiene el movimiento de los cajones en el extremo derecho del muelle (cajones 20-24).





Licuefacción progresiva.  $v_L = 15\text{m/s}$ . Rozamiento variable. Foco en el cajón 23.

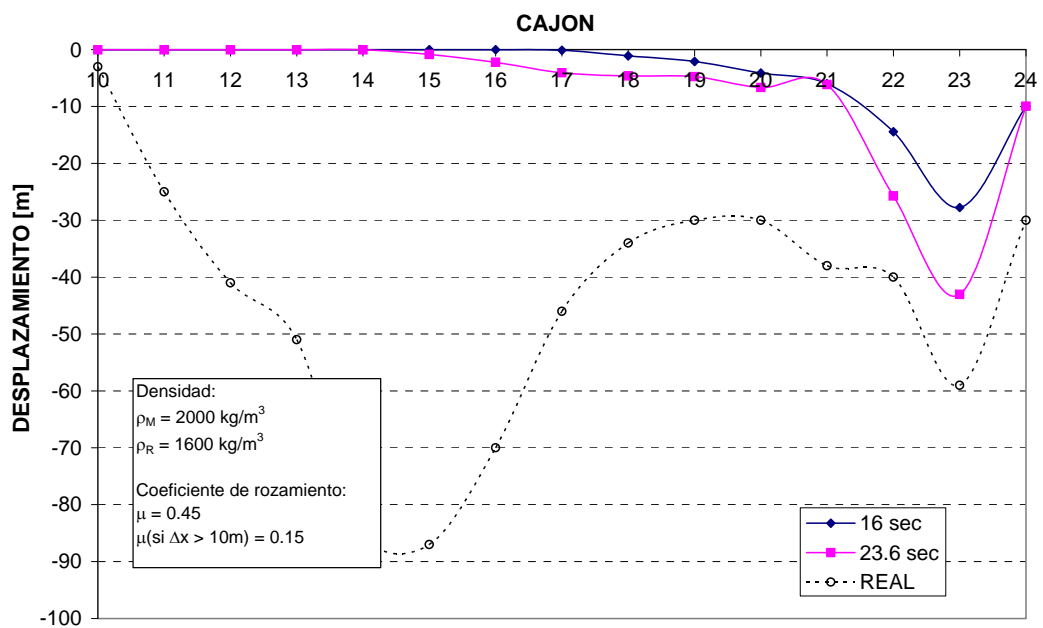


Figura 24. Foco en el cajón 23.Desplazamientos de los cajones.

**Foco en el cajón 23** ( $v_L=15\text{m/s}$ ) (Figura 24): se observa como se genera una protuberancia alrededor del cajón 23 pero en el tiempo de cálculo estudiado no aparece un efecto equivalente en las proximidades del cajón 15.

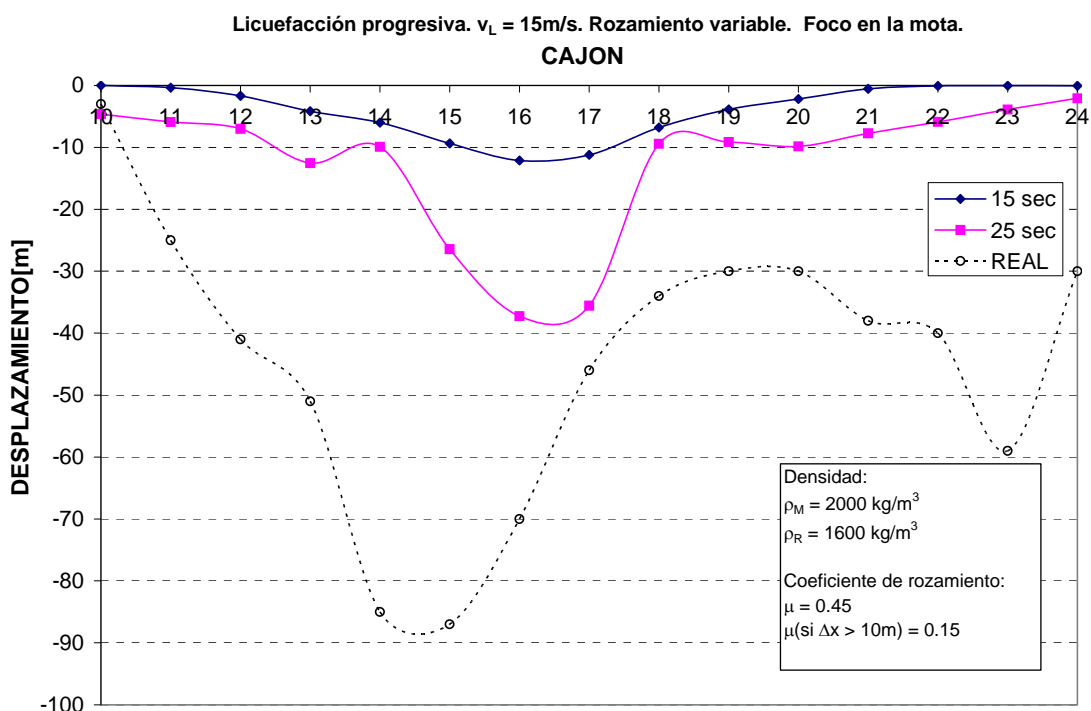
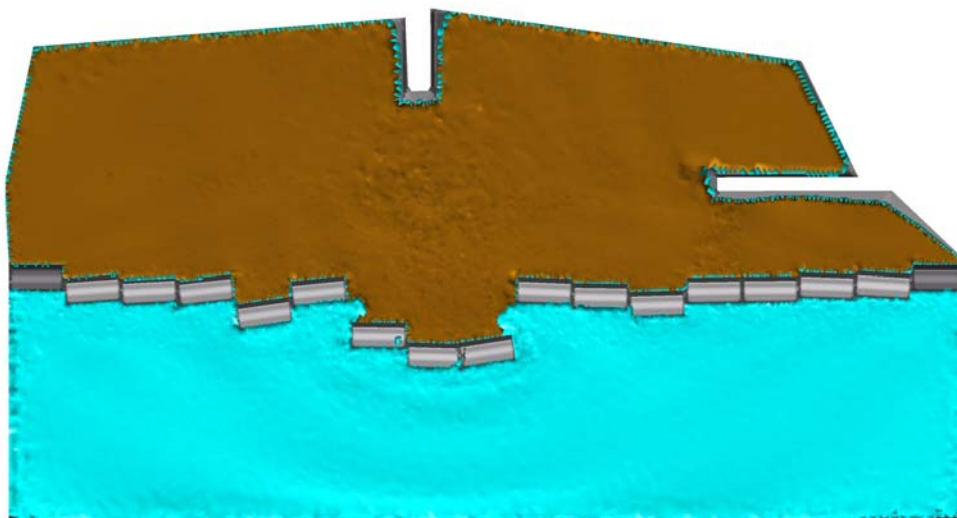
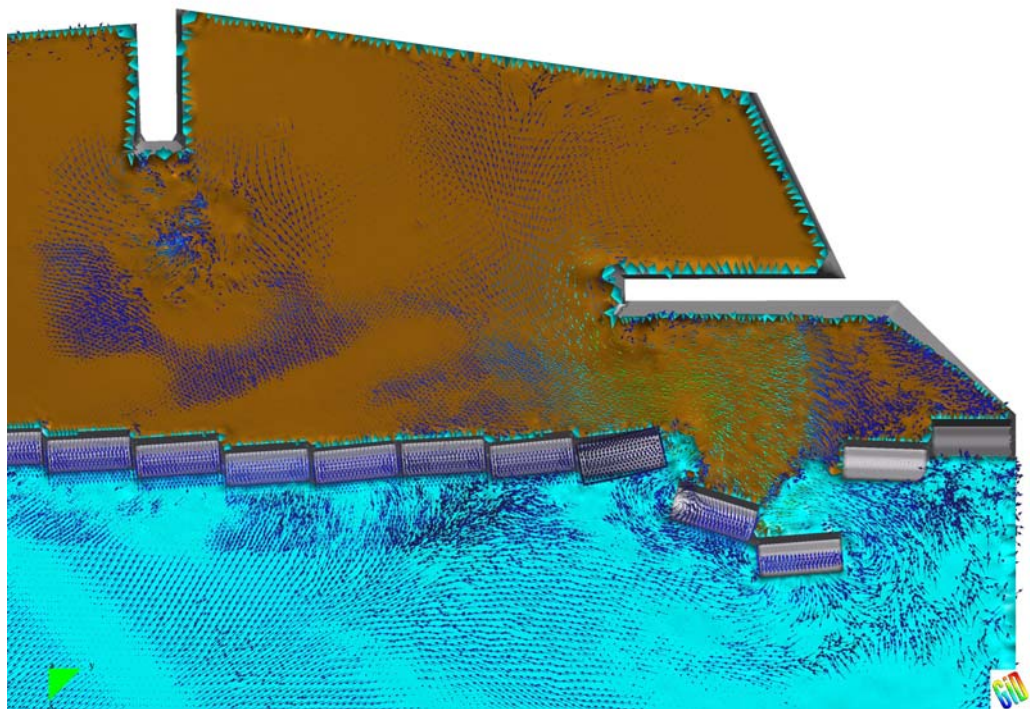
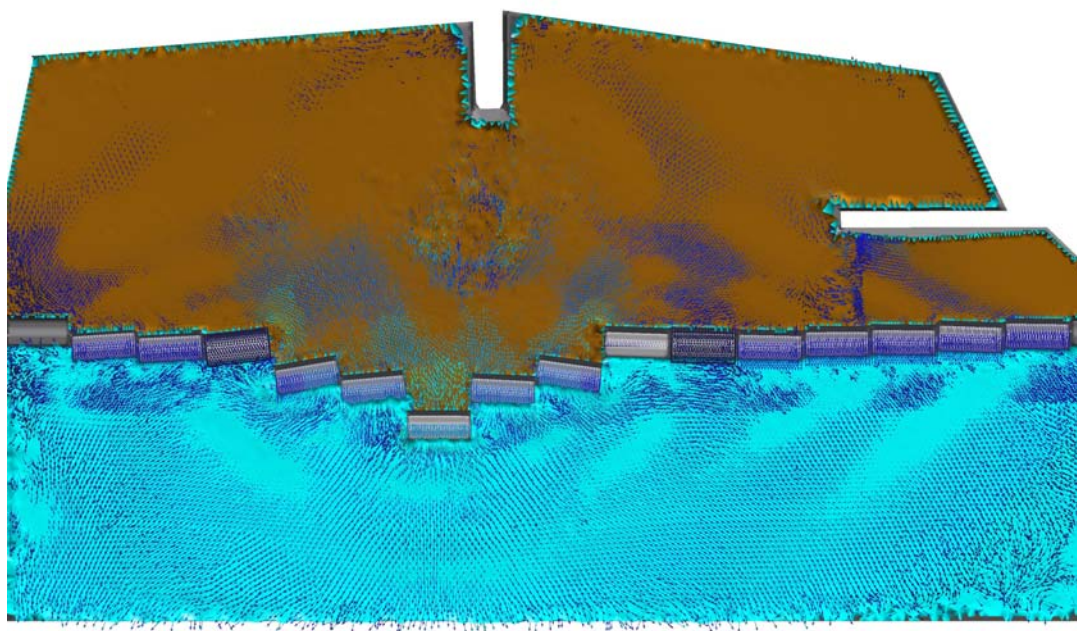


Figura 25. Desplazamientos de los cajones. Foco en la mota norte.

**Foco en la mota norte** ( $v_L=15\text{m/s}$ ) (Figura 24): se puede observar una protuberancia concentrada alrededor de los cajones 16 y 17 que progresa desde los cajones 14 y 18 (que quedan retrasados debido a un flujo que penetra en el recinto). En el tiempo de cálculo estudiado se inicia una segunda protuberancia en las proximidades del cajón 20 (zona de la **mota este**). La salida del relleno licuefactado por la parte central localiza el movimiento de los cajones centrales y detiene el movimiento de los cajones 20-24.

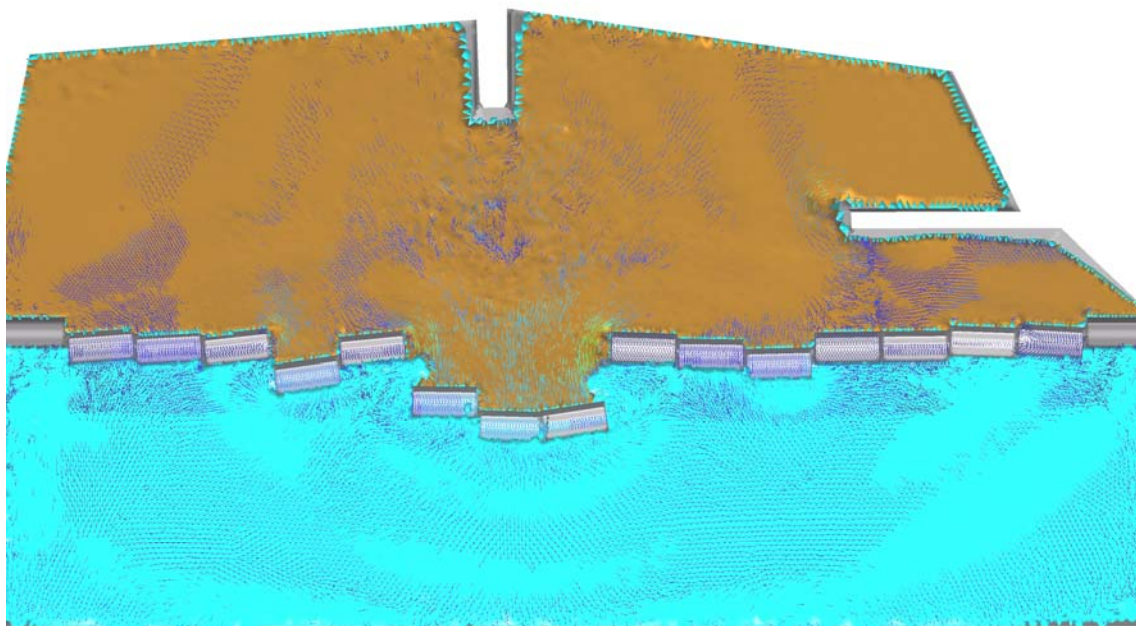


*Figura 26. Foco en el cajón 23. Distribución del flujo del relleno hidráulico.*



*Figura 27. Foco en el cajón 15. Distribución del flujo del relleno.*





*Figura 28. Distribución del flujo del relleno hidráulico con foco de licuefacción en la **mota norte** (lado este).*

Las figuras 25 a 27 muestran la dirección del flujo del relleno hidráulico. Es interesante destacar el hecho de que el material licuefactado tiene una acusada tendencia a dirigirse hacia la zona donde los movimientos son mayores, es decir hacia los cajones más cercanos al foco dónde se inicia el proceso. Al moverse los cajones, el material de relleno se moviliza, les acompaña y el nivel de relleno desciende localmente. Esto provoca un “efecto llamada” del material de relleno adyacente, fenómeno que se reproduce en cadena. Este flujo genera a su vez un empuje sobre los cajones, que se desplazan aún más.

Por otro lado, también se aprecia en las figuras mencionadas la generación de una ola en la dársena que, una vez formada, viaja más rápido que los cajones y se desprende de ellos. El tiempo de movimiento de los cajones, por tanto, está desacoplado del periodo de cualquier ola generada en la dársena.



### 4.2.3 Rozamiento variable. Densidad del relleno hidráulico: 1800 Kg/m<sup>3</sup>

Focos de licuefacción: cajón 15; cajón 17; cajón 23; **mota norte** (lado este); cajon 15 y cajón 23.

Velocidad de propagación de la licuefacción: 10 m/s, 15 m/s, 45 m/s.

Coeficiente de rozamiento: 0,6 si  $\Delta x < 10$  m, 0.25 o 0.4 si  $\Delta x > 10$  m.

Subpresión: equivalente a la del relleno licuefactado.

A continuación se presentan los resultados más relevantes obtenidos en los análisis realizados en los distintos supuestos considerados.

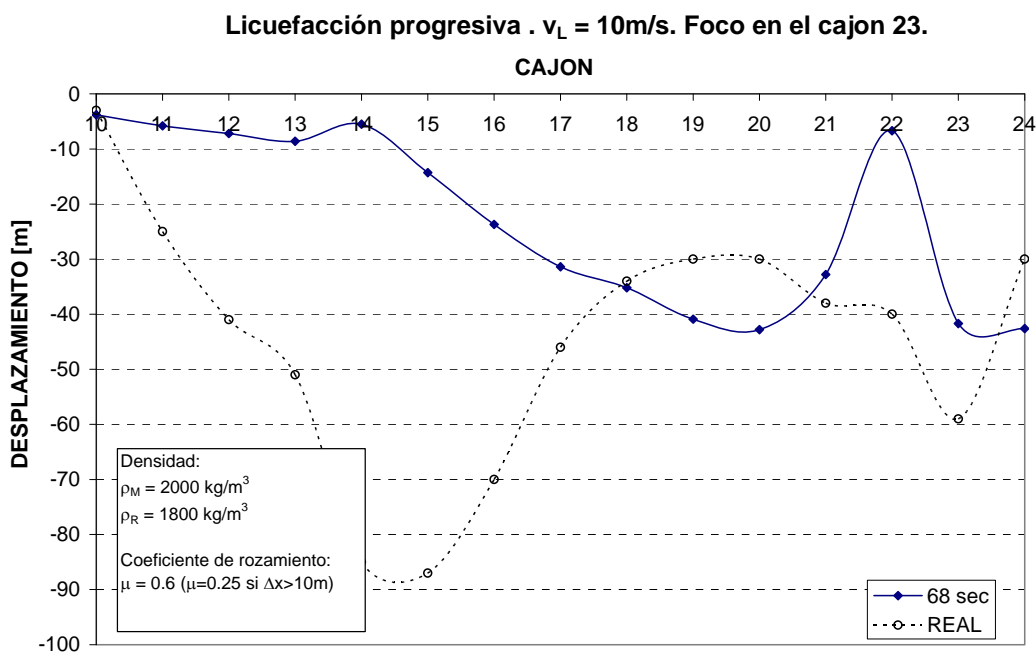


Figura 29. Desplazamientos de los cajones. Foco en el cajón 23.

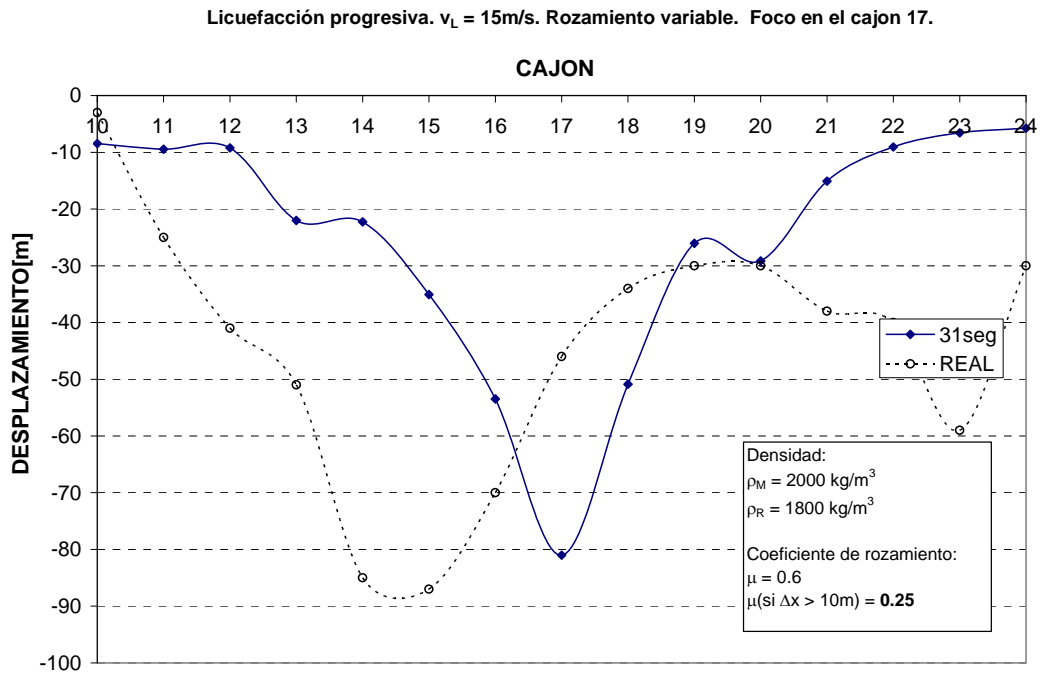


Figura 30. Desplazamientos de los cajones. Foco en el cajón 17.

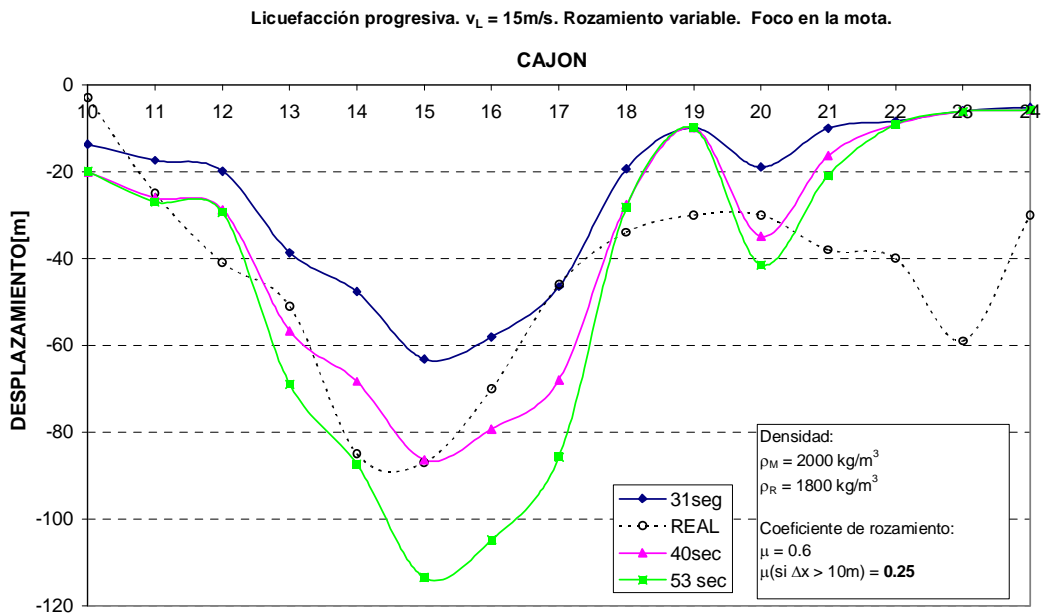


Figura 31. Desplazamientos de los cajones. Foco en la mota norte.

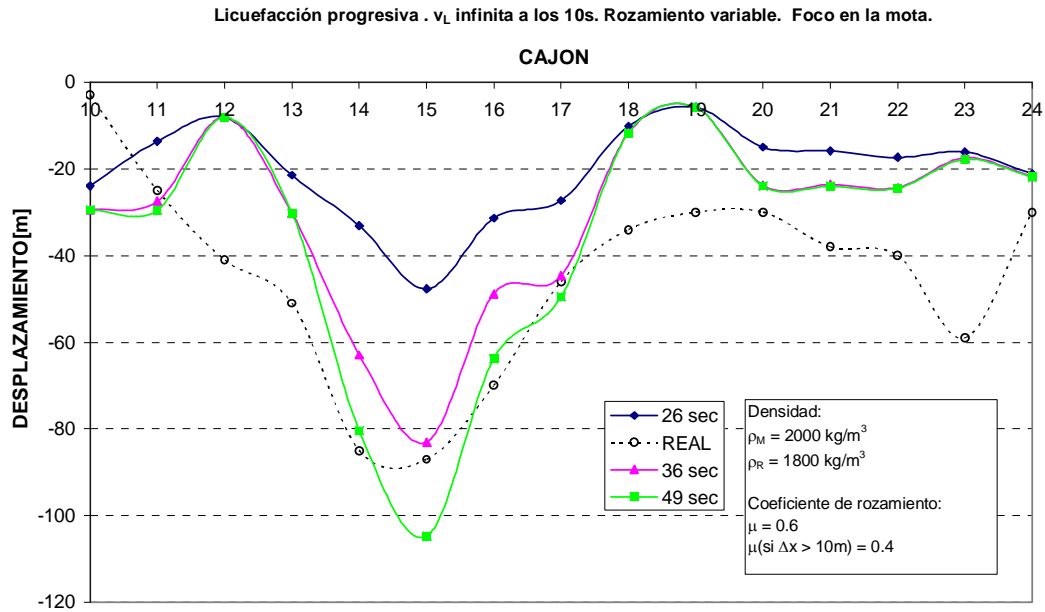


Figura 32. Desplazamientos de los cajones. Foco en la mota norte.

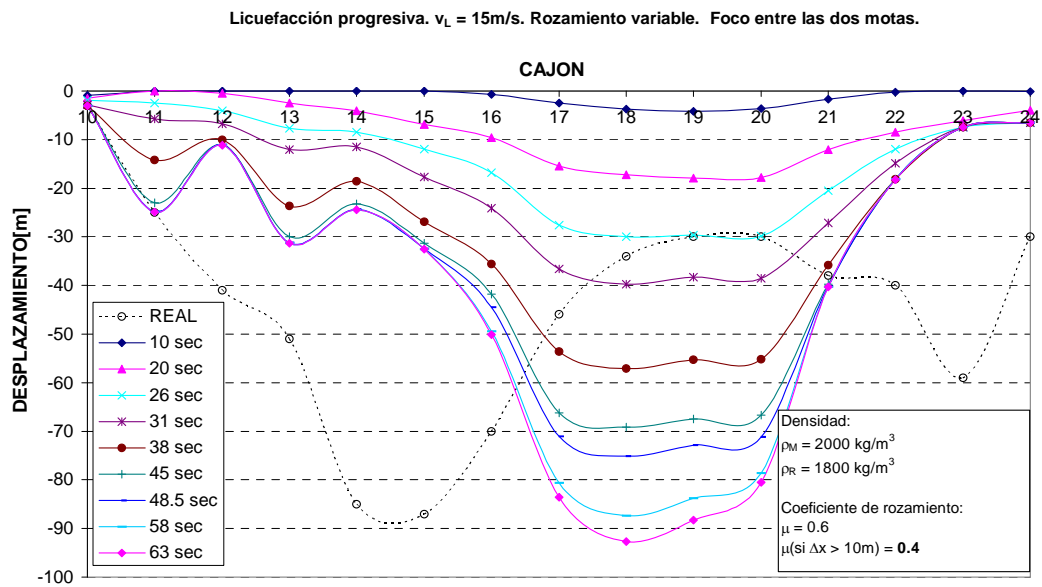


Figura 33. Desplazamientos de los cajones. Foco entre las dos motas

En las figuras 29 a 33 se muestran los resultados de la posición de los distintos cajones para los diferentes focos, velocidades de progreso de la licuefacción y rozamiento considerados. Los gráficos son bastante autoexplicativos y en todos los casos se muestra como referencia la línea de movimientos reales observados. Para interpretar los gráficos correctamente debe tenerse en cuenta el título que incorpora cada uno de ellos en la parte superior, donde se especifica las características más relevantes del cálculo realizado.

Como dato especialmente destacable debe tenerse en cuenta que para las figuras 31, 32 y 33, durante el cálculo se ha considerado el desplome de parte de la **mota este**.

### 4.3 ANÁLISIS 3D. ESCENARIO 3. Licuefacción progresiva. Dos focos de licuefacción.

De los resultados obtenidos con la hipótesis que consideran un solo foco de licuefacción con propagación circular, se concluye que en ninguna de las muchas situaciones consideradas, se reproducen las dos protuberancias observadas en la práctica al redor de los cajones 15 y 23.

Ante esta evidencia, se ha estudiado la hipótesis de existencia de **dos focos de licuefacción**. El primer foco se ha localizado en las proximidades de la mota norte y se propaga a una velocidad de 15 m/s, habiéndose estudiado diferentes posiciones de este foco. El segundo foco se ha localizado en las proximidades del cajón 23 y se activa en el momento en que el frente de licuefacción que progresa desde el primer foco, llega a la línea de cajones.

La aparición de un segundo foco de licuefacción se justifica por el movimiento solidario de la hilera de cajones, que transmite un movimiento dinámico al terreno circundante induciendo una licuefacción cuasi-instantánea de la zona del relleno adyacente al cajón 23 (se ha supuesto una velocidad de avance del frente de licuefacción de 15 m/seg), provocando a su vez el desplome de parte del material todo uno de la **mota este**. Bajo esta hipótesis y calibrando la posición del primer foco de licuefacción, se ha logrado reproducir con bastante fidelidad la forma real de la deformación de la hilera de cajones, con las dos protuberancias esperadas, y con una posición final de los cajones muy similar a la realmente producida en la realidad.

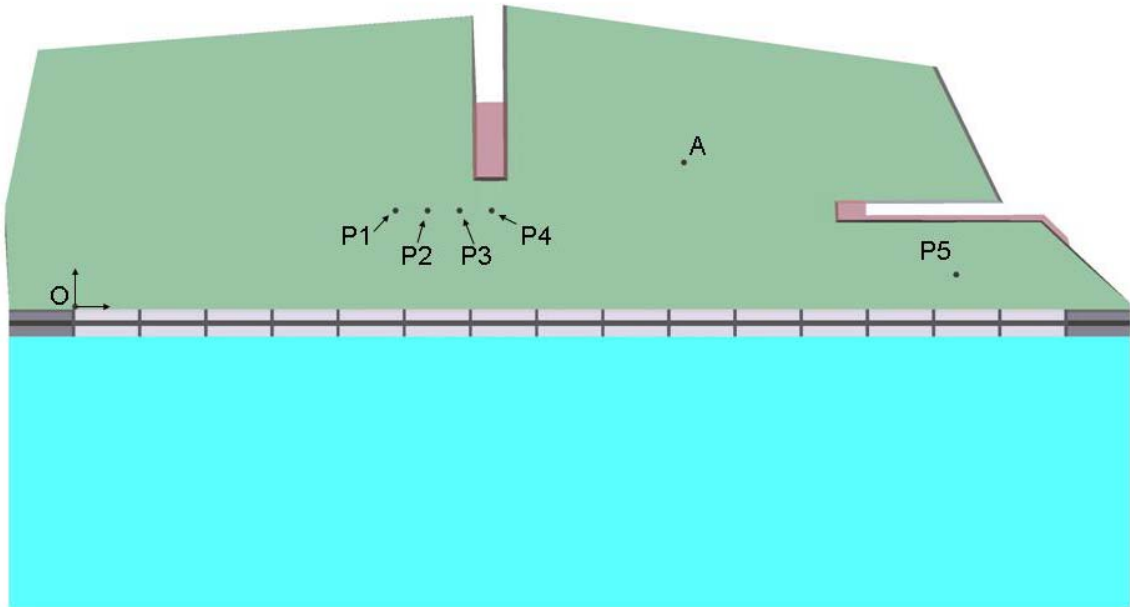


Figura 34. Posición de los distintos focos de licuefacción considerados.

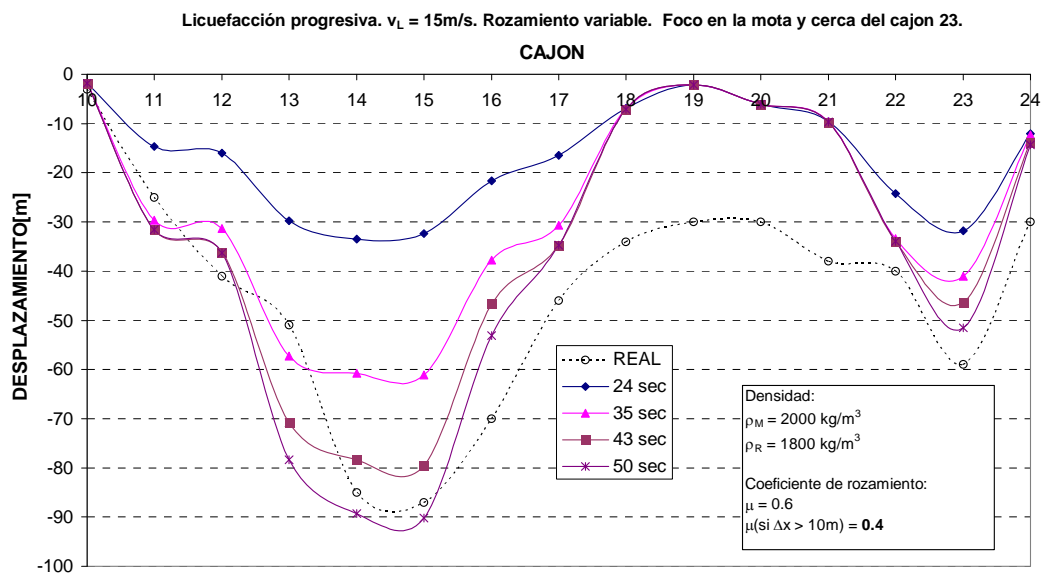


Figura 35. Desplazamientos de los cajones. Dos focos de licuefacción. Primer foco en un punto situado a sur del extremo de la mota norte, punto P1. Segundo foco situado próximo al cajón 23 (iniciándose unos 4 sec más tarde).

La Figura 34 muestra la evolución de la deformada de la hilera de cajones suponiendo una posición del primer foco de licuefacción localizada al sur del extremo de la mota norte (punto P1 de la figura 33). El frente de licuefacción se propaga a 15 m/seg. El segundo foco se inicia cerca del cajón 23 (punto P5 de la figura 33) una vez que el frente de licuefacción anterior alcanza la hilera de cajones (es decir 4 segundos después de iniciarse el proceso de licuefacción primero). Se aprecia que en estas condiciones se reproducen con gran exactitud las dos protuberancias observadas en la realidad alrededor de los cajones 15 y 23.

Sin embargo en esta hipótesis, el movimiento de los cajones 18 a 21 es menor que el real. Esto es posiblemente debido a una localización del flujo del material del relleno hacia la zona de los cajones 14 a 16 y 23, dejando prácticamente descargada la zona próxima a los cajones 18 a 21.

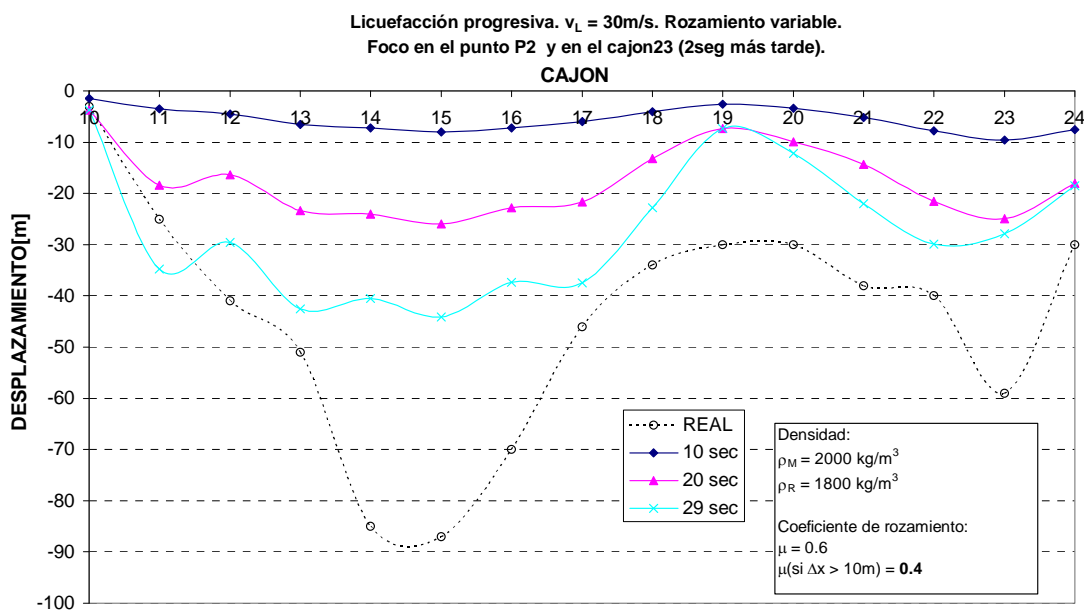


Figura 36. Desplazamientos de los cajones. Dos focos de licuefacción. Primer foco en el punto P2. Segundo foco situado próximo al cajón 23 (iniciándose unos 2seg más tarde).

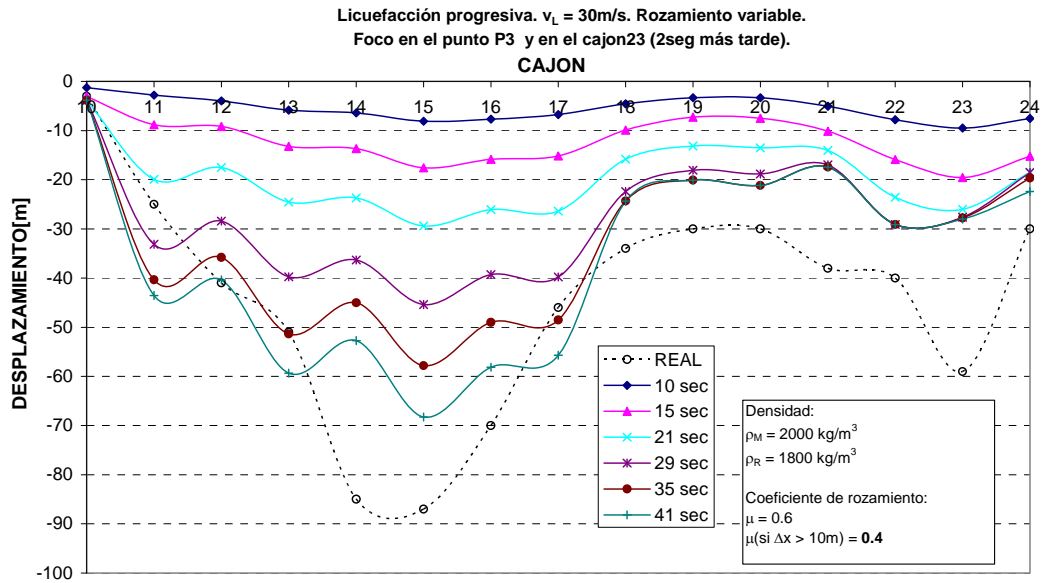


Figura 37. Desplazamientos de los cajones. Dos focos de licuefacción. Primer foco en el punto P3. Segundo foco situado próximo al cajón 23 (iniciándose unos 2 sec más tarde).

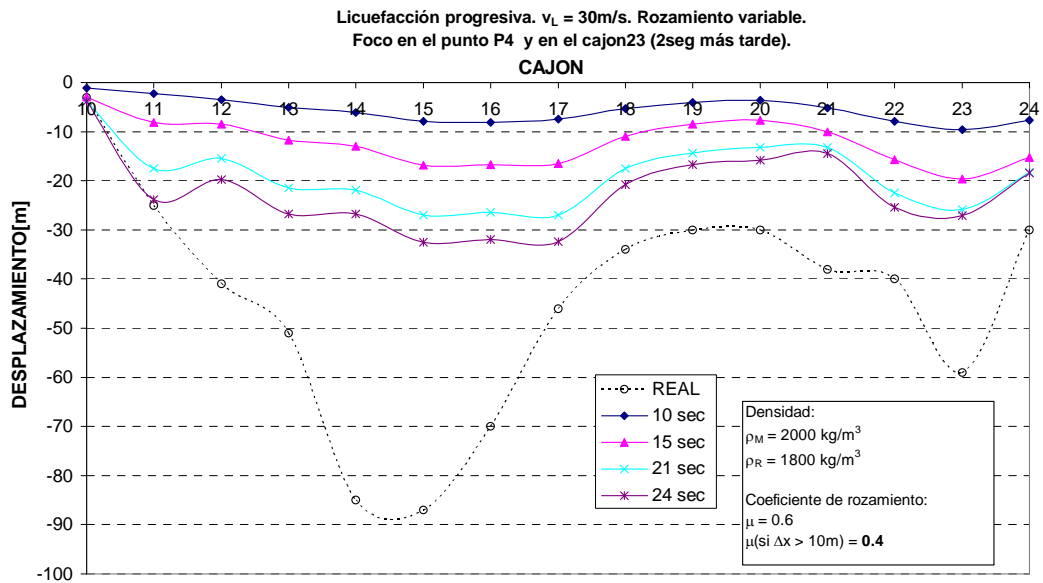
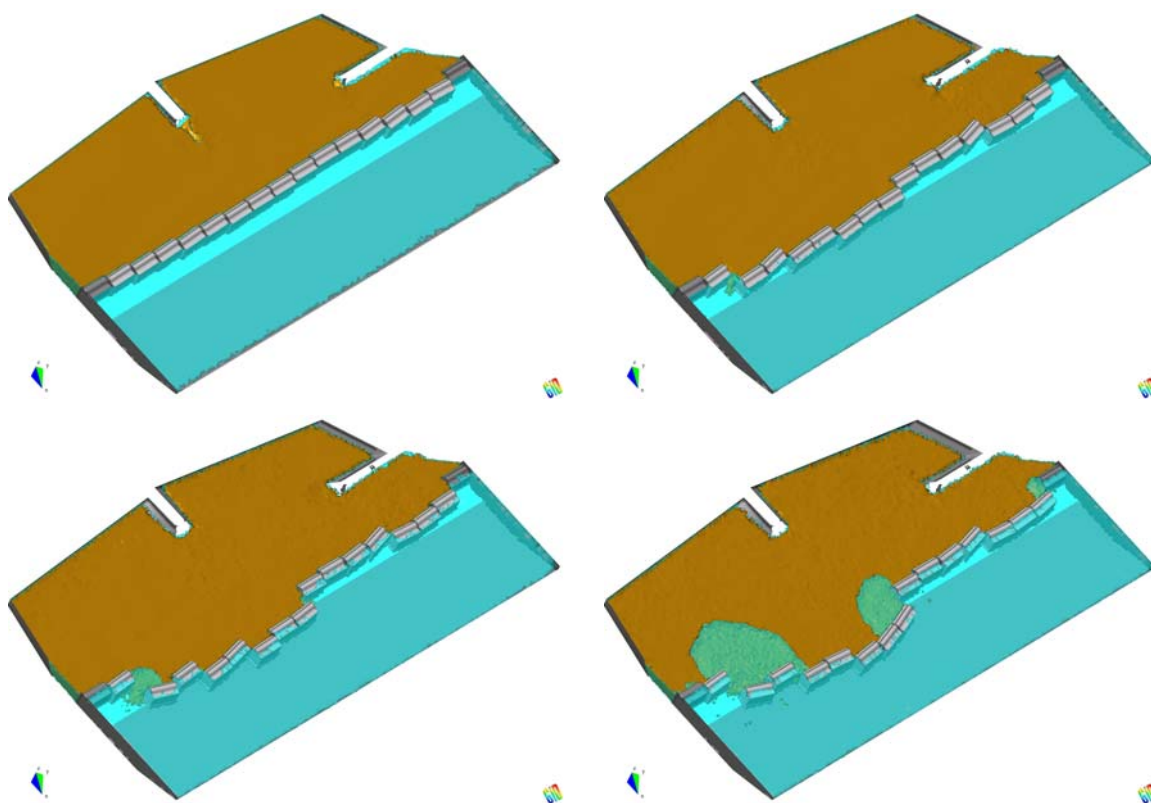


Figura 38. Desplazamientos de los cajones. Dos focos de licuefacción. Primer foco en el punto P4. Segundo foco situado próximo al cajón 23 (iniciándose unos 2 sec más tarde).



Las Figuras 35 a 38 muestran la deformación de la línea de cajones suponiendo la posición de un primer foco de licuefacción ligeramente desplazado hacia el norte (20 metros en cada caso) con respecto a la posición inicial P1 definida en la figura 33 (puntos P2, P3, P4 de la mencionada figura). En todos los casos se supone que el segundo foco en las proximidades del cajón 23 se activa una vez que el primer frente alcanza la hilera de cajones.

En la Figura 39 se puede ver una perspectiva global de la deformación de la hilera de cajones en varios instantes de tiempo cuando existen dos focos de licuefacción situados en los puntos P3 y en el cajón 23 respectivamente (puntos definidos en la Figura 37).



*Figura 39. Desplazamiento de los cajones en diferentes instantes de tiempo. Dos focos de licuefacción. Primer foco en el punto P3. Segundo foco situado próximo al cajón 23*

Se aprecia que en todos los casos estudiados (figuras 35 a 38) se reproducen las dos protuberancias observadas en la realidad, siendo quizás la hipótesis asociada con la Figura 37 (foco de licuefacción inicial en  $P_3$ , foco de licuefacción secundario en cajón 23 que se inicia 2 seg después,  $v= 30$  m/seg) la que reproduce unos resultados, para la deformación del conjunto de cajones, más próximos al movimiento real final.

#### 4.4 ANÁLISIS 3D. ESCENARIO 4. Un foco de licuefacción asimétrico

Como hipótesis final se ha estudiado también la posibilidad de **un único foco de licuefacción** que se propaga de manera **asimétrica**, es decir con un frente de licuefacción con forma de círculo truncado (Figura 40). El foco se ha supuesto que se encuentra en un punto intermedio entre las dos motas y que se propaga a una velocidad de 15 m/seg.

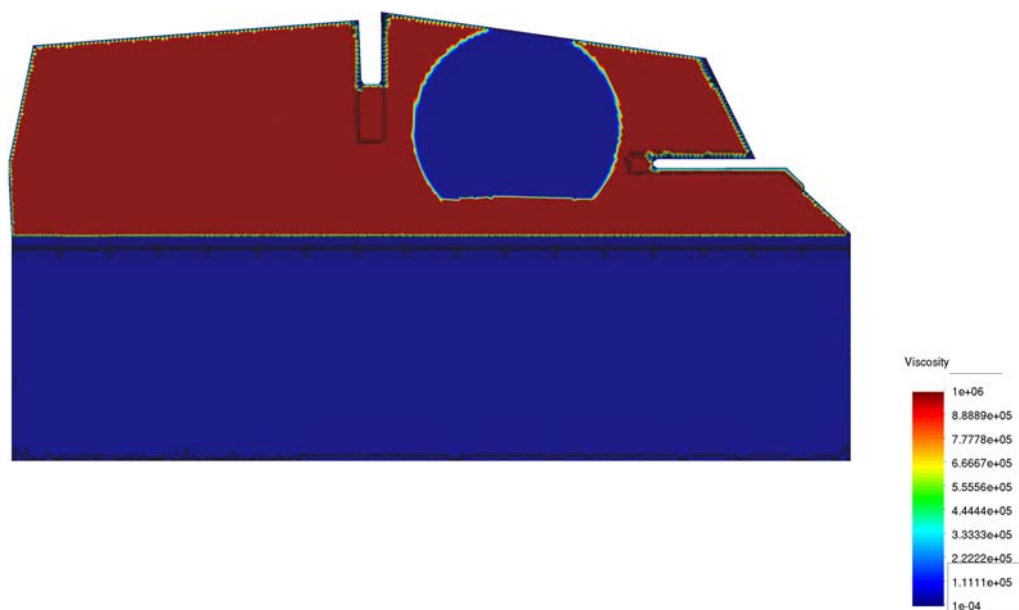
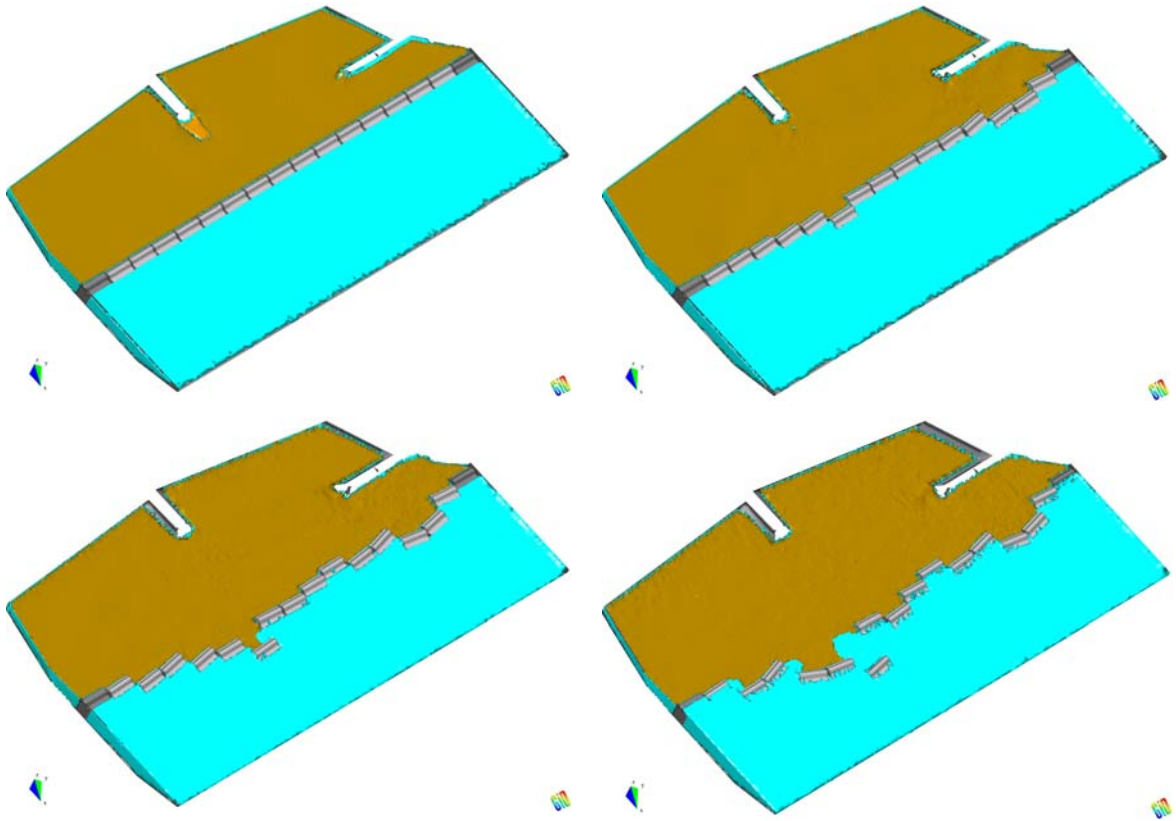


Figura 40. Frente de licuefacción con forma asimétrica

Este escenario conduce a que se active casi simultáneamente el movimiento de los cajones próximos al cajón 15 y 23. Este efecto es similar al producido por la existencia de los dos focos de licuefacción independientes (de acuerdo con escenario 3).

En la Figura 41 se puede ver una perspectiva global de la deformación de la hilera de cajones en varios instantes de tiempo cuando existe el foco de licuefacción asimétrico considerado en este apartado.



*Figura 41. Desplazamiento de los cajones en diferentes instantes de tiempo. Un solo foco de licuefacción con frente de propagación asimétrico situado entre los extremos de las dos motas.*

Los resultados de los análisis realizados se muestran con más detalle en la Figura 42. Es de resaltar que bajo esta hipótesis se reproducen las dos protuberancias en los alrededores de los cajones 15 y 23 respectivamente así como una deformación global de la hilera de cajones que se ajusta bastante bien también cuantitativamente a lo observado en la realidad.

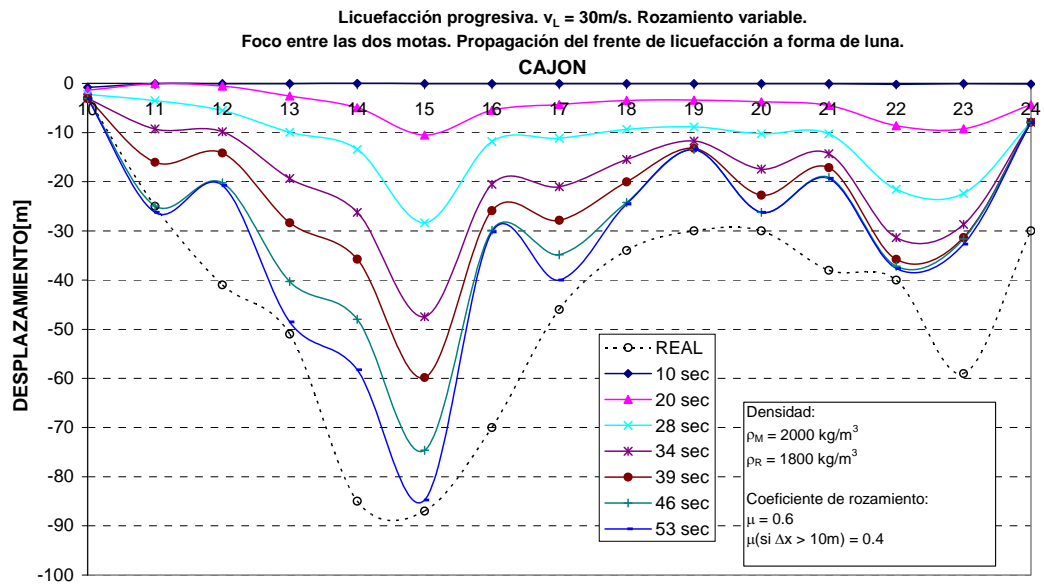


Figura 42. Desplazamientos de los cajones. Un solo foco de licuefacción con frente de propagación asimétrico situado entre los extremos de las dos motas.

## 5 CONCLUSIONES

De los análisis realizados cuyos resultados han sido comentados en los apartados anteriores se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 1) El movimiento de los cajones queda justificado cuando se produce una licuefacción del relleno.
- 2) La licuefacción del terreno induce un movimiento del mismo que provoca unas fuerzas dinámicas adicionales sobre la hilera de cajones. La licuefacción, a su vez, da lugar a la caída de la mota norte, que provoca un incremento de la presión dinámica sobre los cajones
- 3) El movimiento de los cajones es muy sensible a los valores de la densidad del relleno. En los estudios bidimensionales realizados se ha encontrado que un aumento de la densidad del relleno de 1.600 a 1.800 Kg/m<sup>3</sup> (un 12,5%) provoca un aumento del desplazamiento del cajón de 4.5 m a 7 m (un 55.5%) en los primeros segundos.
- 4) El movimiento tridimensional de los cajones es muy sensible a la ubicación del foco de inicio de la licuefacción y a la velocidad de propagación de la licuefacción en el relleno.
- 5) Con la hipótesis de licuefacción instantánea en todo el relleno, el movimiento de todos los cajones es bastante homogéneo, no reproduciendo por tanto las dos protuberancias observadas en la realidad.
- 6) Considerando el foco de licuefacción en las proximidades de la mota norte, se reproduce la deformación circular de la zona de cajones 10 a 17. La deformación de los cajones 20 a 24 es función, en este caso, de la velocidad de propagación del frente de licuefacción. Para velocidades bajas (del orden de 15 m/seg) la deformación de estos cajones es baja, mientras que para una velocidad de propagación mayor, aumenta la deformación en esta zona.

- 7) La introducción de un foco de licuefacción en las proximidades del cajón 23 induce dos zonas de deformación en la alineación de cajones. La localización de estas zonas es función de la velocidad de propagación del frente de licuefacción. Para velocidades bajas (del orden de 10 m/seg) la deformación se concentra alrededor de los cajones 18 a 21 y 23 a 24. Para velocidades altas (del orden de 50 m/seg) la deformación se concentra alrededor de los cajones 17 a 19 y 23 a 24. En ambos casos los resultados obtenidos en los cálculos realizados no representan correctamente la realidad de los movimientos observados.
- 8) En líneas generales la posición del foco de licuefacción concentra el desplazamiento de los cajones en las zonas más próximas. También, cuando una zona de cajones se mueve apreciablemente más que el resto, el flujo del relleno se dirige hasta esta zona, aumentando con ello el desplazamiento de los cajones ubicados en sus proximidades.
- 9) La consideración de dos focos de licuefacción activados progresiva y secuencialmente situados cerca del extremo de la mota norte y en las proximidades del cajón 23 reproduce con bastante fidelidad las dos protuberancias observadas en la realidad, es decir en los alrededores de los cajones 15 y 23. Un estudio paramétrico de la posición del primer foco da como resultado que si dicho foco está en la posición P3 (se puede identificar en la Figura 37), la forma final de la deformación de la hilera de cajones coincide razonablemente bien con lo observado en la realidad.
- 10) Se reproduce también con bastante aproximación el desplazamiento de la hilera de cajones si se considera un único foco de licuefacción situado en una posición intermedia entre los extremos de las dos motas, norte y este, y con un frente de licuefacción asimétrico que se propaga con una velocidad de 15 m/seg (descrito en la Figura 40 a 42).

Como conclusión final del estudio realizado, se remarca que se ha podido reproducir, con la aproximación ingenieril requerida, el movimiento observado de la hilera de cajones después de la avería, al considerar el relleno licuefactado con:

- a) dos focos de licuefacción (uno ubicado en los alrededores del extremo de la mota norte y otro cerca del cajón 23) que se propagan con un frente de amplitud creciente y que se activan de forma secuencial (el segundo foco se activa cuando el frente de licuefacción creado por el primer foco alcanza la línea de cajones, es decir unos dos segundos después si la  $v_L = 30\text{m/s}$  o unos cuatro segundos después si la  $v_L = 15\text{m/s}$ ) (Figuras 36 a 39).
- b) un único foco de licuefacción con un frente de avance asimétrico situado en el punto ubicado entre y equidistante de los extremos de las motas norte y este (Figuras 41 a 42).

## REFERENCIAS

E. Oñate, S.R Idelsohn,.F. Del Pin, and R. Aubry, *The Particle Finite Element Method. An overview*, International Journal of Computational Method, , (2004), 2,267-307.

S.R. Idelsohn, E. Oñate, F Del Pin, *The Particle Finite Element Method: a powerful tool to solve incompressible flows with free surfaces and breacking waves*, Int. J. Num. Meth. Engng. 61 (2004) 964-989.

S.R. Idelsohn, E. Oñate, F Del Pin , N. Calvo, *Fluid- stucture interaction using the Particle Finite Element Method*, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. 195 (2006) 2100-2113.

E.Oñate, S.R. Idelsohn, M. A. Celigueta and R. Rossi, *Advanced in the Particle Finite Element Method for the analysis of fluid-multibody interaction and bed erosion in free surface flows*, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., accepted for pubblication, CMAME (2007).

A.Larese, R. Rossi, E. Oñate, S.R. Idelsohn, *Validation of the Particle Finite Element Method (PFEM) for simulation of free surface flows*, submitted to Engineering and Computation.

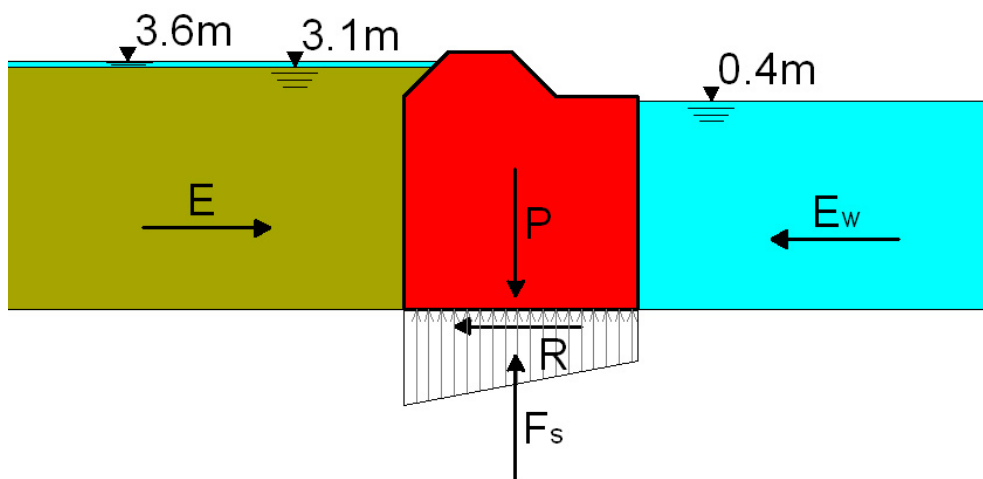
I. Rodriguez-Arévalo. *Análisis postcrítico de la avería del Muelle del Prat de la Autoridad Portuaria de Barcelona el 1 de Enero de 2007*. Informe Técnico. Junio de 2007



## **Apéndice 1. Equipo de trabajo.**

Eugenio Oñate,	Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Benjamin Suarez,	Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Sergio Idelsohn,	Dr. Ingeniero Industrial
Riccardo Rossi,	Dr. Ingeniero Civil
Miguel Angel Celigueta,	Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Antonia Larese De Tetto,	Ingeniero Civil.

**Apéndice 2. Estudio del coeficiente de seguridad al deslizamiento elástico de un cajón.**



**Figura A2.1** Geometría para el estudio 2D

**Empuje del relleno licuefactado ( $E_r$ ) + columna de agua ( $E_a$ ):  $E$  (N/m)**

$$E_r \cong \frac{1}{2} (19.10)^2 \cdot 16000 = 2.92 \times 10^6 \text{ N / m}$$

$$E_a = \left[ 0.50 \times 19.1 + \frac{1}{2} (0.40)^2 \right] \times 10.000 = 0.08 \times 10^6 \text{ N / m}$$

$$E = E_r + E_a \cong 3.0 \times 10^6 \text{ N / m}$$

**Empuje hidrostático sobre pared mar:  $E_w$  (N/m)**

$$E_w \cong \frac{1}{2} (16.4)^2 \times 10000 = 1.34 \times 10^6 \text{ N / m}$$

**Peso total (cajón + mota):  $P$  (N/m)**

$$\text{Peso cajón: } P_c = 6.77 \times 10^6 \text{ N} / m$$

$$\text{Peso mota: } P_m = 0.53 \times 10^6 \text{ N} / m$$

$$P = 7.30 \times 10^6 \text{ N} / m$$

**Empuje de la subpresión:  $F_s$**

1) **Subpresión hidrostática:  $F_{sa}$**

$$F_{sa} = \frac{1}{2}(19.5 + 16.40) \times 18.5 \times 10^4 = 3.32 \times 10^6 \text{ N} / m$$

*Peso sumergido:  $P_{sa}$*

$$P_{sa} = P - F_{sa} = 3.98 \times 10^6 \text{ N/m}$$

2) **Subpresión debida al relleno licuefactado:  $F_{sr}$**

$$F_{sr} = \frac{1}{2}(16 \times 19.5 + 10 \times 16.5) \times 18.5 \times 10^3 = 4.41 \times 10^6 \text{ N} / m$$

*Peso sumergido:  $P_{sr}$*

$$P_{sr} = P - F_{sr} = 2.89 \times 10^6 \text{ N/m}$$

*Peso sumergido medio:  $P_s$*

$$P_s = \frac{1}{2}(P_{sr} + P_{sa}) = 3.43 \times 10^6 \text{ N} / m$$

**Coeficiente de seguridad considerando el empuje de la subpresión hidrostática  $F_{sa}$**

*Peso sumergido:*  $P_{sa} = 3.98 \times 10^6 \text{ N/m}$

*Fuerza de rozamiento:  $F_R$*

$$\mu = 0.6 \quad F_{R1} = 2.38 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$\mu = 0.45 \quad F_{R2} = 1.79 \times 10^6 \text{ N/m}$$

**Coeficientes de seguridad**

$$C_1(\mu = 0.6) = \frac{F_{R1}}{E - E_w} = \frac{2.38}{1.66} = 1.43$$

$$C_2(\mu = 0.45) = \frac{F_{R2}}{E - E_w} = \frac{1.79}{1.66} = 1.08$$

**Coeficiente de seguridad considerando la subpresión del relleno licuefactado**

*Peso sumergido:*  $P_{sr} = 2.89 \times 10^6 \text{ N/m}$

*Fuerza de rozamiento*

$$\mu = 0.6 \quad F_{R1} = 1.73 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$\mu = 0.45 \quad F_{R2} = 1.30 \times 10^6 \text{ N/m}$$

**Coeficientes de seguridad**

$$C_1(\mu = 0.6) = \frac{F_{R1}}{E - E_w} = \frac{1.73}{1.66} = 1.04$$

$$C_2(\mu = 0.45) = \frac{F_{R2}}{E - E_w} = \frac{1.30}{1.66} = 0.78$$

**Coeficiente de seguridad considerando el peso sumergido medio**

*Peso sumergido:*  $P_s = 3.43 \times 10^6 \text{ N/m}$

*Fuerza de rozamiento*

$$\mu = 0.6 \quad F_{R1} = 2.06 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$\mu = 0.45 \quad F_{R2} = 1.54 \times 10^6 \text{ N/m}$$

***Coefficientes de seguridad***

$$C_1(\mu = 0.6) = \frac{F_{R1}}{E - E_w} = \frac{2.06}{1.66} = 1.24$$

$$C_2(\mu = 0.45) = \frac{F_{R2}}{E - E_w} = \frac{1.54}{1.66} = 0.93$$

Coeficiente de seguridad	Subpresión hidrostática	Subpresión con terreno licuefactado	Subpresión media
$\mu = 0.6$	1.43	1.04	1.24
$\mu = 0.45$	1.08	0.78	0.93

**Cuadro 1.** *Coeficientes de seguridad al deslizamiento estático considerando diferentes tipos de subpresión y dos coeficientes de rozamiento*